

VŠB-Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechaniky

Úprava konstrukce zavěšeného zásobníku s cílem minimalizace  
vodorovných reakcí

Design Modification of the Hung-up Silo in Order to Minimalize  
Horizontal Reaction Forces

Student

Vít Sebera

Vedoucí bakalářské práce

prof. Ing. Pert Horyl, CSc

Ostrava 2010

## Zadání bakalářské práce

Student: **Vít Sebera**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 3901R003 Aplikovaná mechanika  
Téma: **Úprava konstrukce zavěšeného zásobníku s cílem minimalizace  
vodorovných reakcí  
Design Modification of the Hung-up Silo in Order to Minimize  
Horizontal Reaction Forces**

Zásady pro vypracování:

1. Vytvořte v prostředí programu ANSYS podprogram pro zadání spojitého tlaku na stěnu. Průběh tlaku bude zadán funkčním vztahem.
2. Podle zadané výkresové dokumentace vytvořte výpočtový model bez výztuže horní roviny zásobníku a stanovte vodorovné složky reakcí.
3. Navrhněte vyztužení horní roviny zásobníku tak, aby vodorovné reakce do nosné OK byly co nejmenší.
4. Proveďte detailní diskusi výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

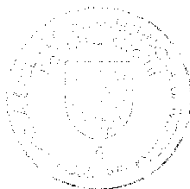
1. Studnička, J. a kol. *OCELOVÉ KONSTRUKCE 2. Zatížení*. ČVUT v Praze. Fakulta stavební. 2009. 139 s. ISBN 978-80-01-03768-3
2. Macháček, J., Studnička, J. *OCELOVÉ KONSTRUKCE 2*. ČVUT v Praze. Fakulta stavební. 2005. 152 s. ISBN 978-80-01-03174-8
3. Medek, J. *Mechanické pochody*. VUT v Brně. 1998. 217 s. ISBN 80-214-1264-X
4. Výkresová dokumentace firmy TRINOM s.r.o.
5. ANSYS® ANSYS Academic Research, Release 12.0, Help System
6. <http://www.ansys.net>

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Petr Horyl, CSc.**

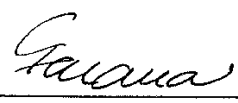
Datum zadání: 20. 10. 2009

Datum odevzdání: 21. 5. 2010



  
doc. Ing. Jiří Podešva, Ph.D.

vedoucí katedry

  
prof. Ing. Radim Farana, CSc.

děkan fakulty

***Místopřísežné prohlášení studenta***

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě .....

.....  
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :.....

.....  
podpis studenta

Vít Sebera

Okružní 1125, Bohumín

#### Anotace bakalářské práce

SEBERA. V. *Úprava konstrukce zavěšeného zásobníku s cílem minimalizace vodorovných reakcí* : bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechaniky, 2010. Bakalářská práce, Vedoucí Horyl P.

Bakalářská práce se zabývá určením velikostí vodorovných reakcí v místě uchycení zásobníku k nosné konstrukci. Poté navrhnutí konstrukční úpravy zásobníku s cílem tyto reakce minimalizovat. Modelování a výpočty reakcí jsou provedeny v konečnoprvkovém programu ANSYS v prostředí Mechanical APDL.

#### Annotation of bachelor thesis

SEBERA. V. *Design Modification of the Hung-up Silo in Order to Minimize Horizontal Reaction Forces* : bachelor thesis. Ostrava : VŠB –Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of mechanics.

Bachelor thesis striving to determine the size of the horizontal reactions on a silo where it is attached to the supporting construction. Then to design construction modification of silo in order to minimize these reactions. Modeling and calculations of reactions are done in FEM program ANSYS in modul Mechanical APDL.

## Obsah bakalářské práce

<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>8</b>
1.1. POPIS TECHNICKÉHO ZAŘÍZENÍ .....	8
1.2. STANOVENÍ TYPU ZÁSOBNÍKU .....	10
<b>1.3. TEORETICKÝ PRŮBĚH TLAKŮ OD SYPKÝCH HMOT.....</b>	<b>12</b>
1.4. CÍL PRÁCE .....	15
<b>2. VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ.....</b>	<b>16</b>
2.1. VÝPOČET TLAKŮ V ZÁSOBNÍKU .....	16
2.2. URČENÍ SIL OD TLAKU HNĚDÉHO UHLÍ.....	18
2.3. TVORBA VÝPOČTOVÉHO MODELU .....	20
2.3.1. <i>Tvorba geometrie</i> .....	20
2.3.2. <i>Použité prvky MKP</i> .....	25
2.3.3. <i>Tvorba konečnoprvkového modelu</i> .....	27
2.4. OKRAJOVÉ PODMÍNKY.....	31
2.4. VÝSLEDKY .....	34
<b>3. KONSTRUKČNÍ ÚPRAVY.....</b>	<b>37</b>
3.1. VYZTUŽENÍ POMOCÍ PLECHŮ .....	37
3.2. VYZTUŽENÍ NOSNÍKY PROFILU I .....	38
3.3. TABULKY VELIKOSTÍ REAKCÍ .....	40
<b>4. ZÁVĚR.....</b>	<b>42</b>
<b>5. POUŽITÁ LITERATURA.....</b>	<b>43</b>

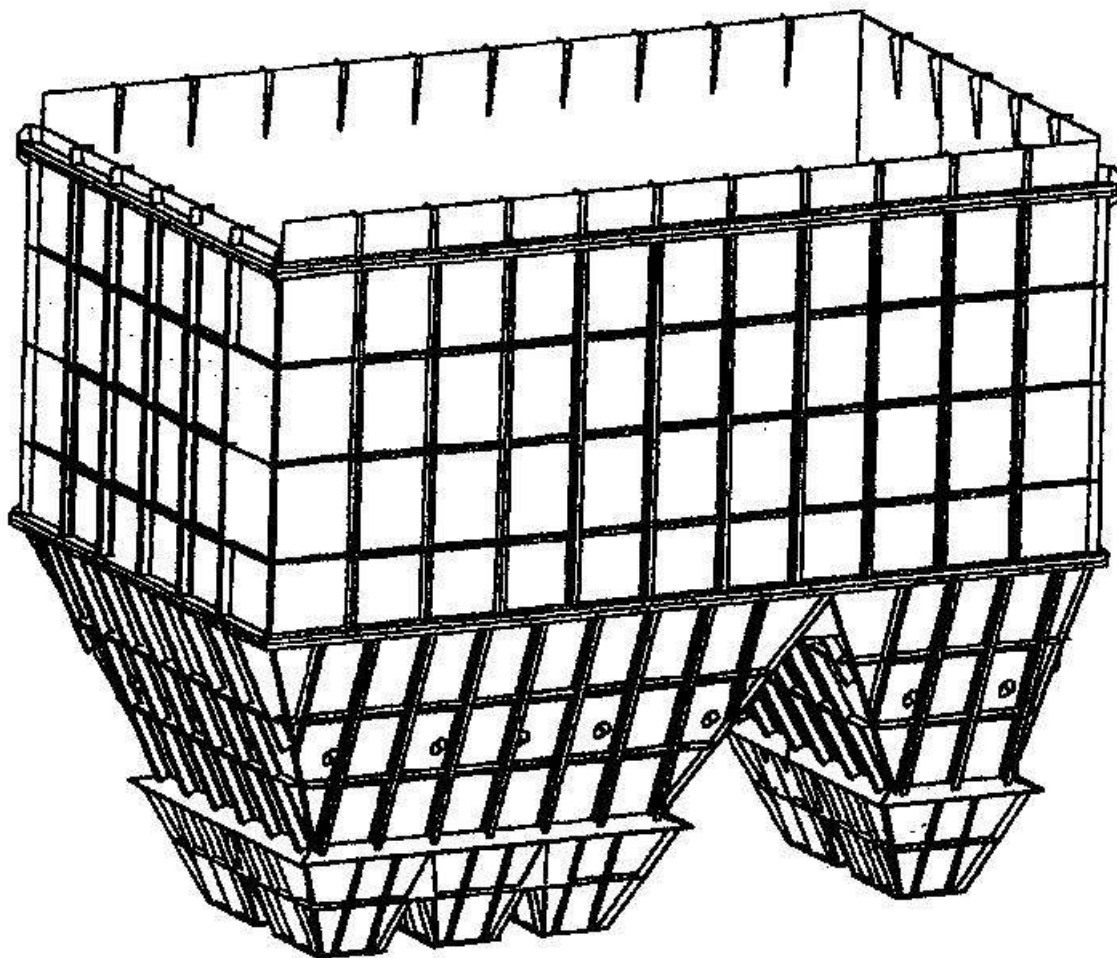
## Seznam použitých značek a symbolů

A.....	plocha průřezu zásobníku.....	[ m <sup>2</sup> ]
A1.....	plocha komponenty 1.....	[ m <sup>2</sup> ]
E.....	modul pružnosti v tahu.....	[MPa]
FA1.....	síla na komponentu A1.....	[ N ]
O.....	obvod zásobníku.....	[ m ]
R.....	reakce.....	[ N ]
Rh.....	hydraulický poloměr.....	[ m ]
T.....	třecí síla.....	[ N ]
Z.....	zatížení svaru.....	[kN/m]
d <sub>c</sub> .....	hydraulický poloměr.....	[ m ]
f <sub>w</sub> .....	součinitel tření mezi stěnou a materiálem..	[ - ]
k.....	součinitel bočního napětí.....	[ - ]
h.....	výška komory zásobníku.....	[ m ]
p <sub>H</sub> .....	horizontální tlak.....	[N.m <sup>-2</sup> ]
p <sub>v</sub> .....	vertikální tlak.....	[N.m <sup>-2</sup> ]
z.....	vzdálenost od hladiny materiálu.....	[ m ]
Φ.....	úhel tření na stěnu zásobníku.....	[ ° ]
φ.....	úhel vnitřního tření materiálu.....	[ ° ]
γ.....	objemová tíha náplně.....	[ N.m <sup>-3</sup> ]
μ.....	Poissonova konstanta.....	[ - ]
ρ.....	hustota oceli.....	[ kg.m <sup>-3</sup> ]
ρ' .....	objemová sypná hmotnost.....	[ kg.m <sup>-3</sup> ]

# 1. Úvod

## 1.1. Popis technického zařízení

Zařízení je zásobník s pravoúhlými komorami na hnědé uhlí, který stojí v teplárně Tábor. Zásobník je přibližně 11m dlouhý, 6m široký a 9m hluboký. Jeho užitečný objem je přibližně 400m<sup>3</sup>.



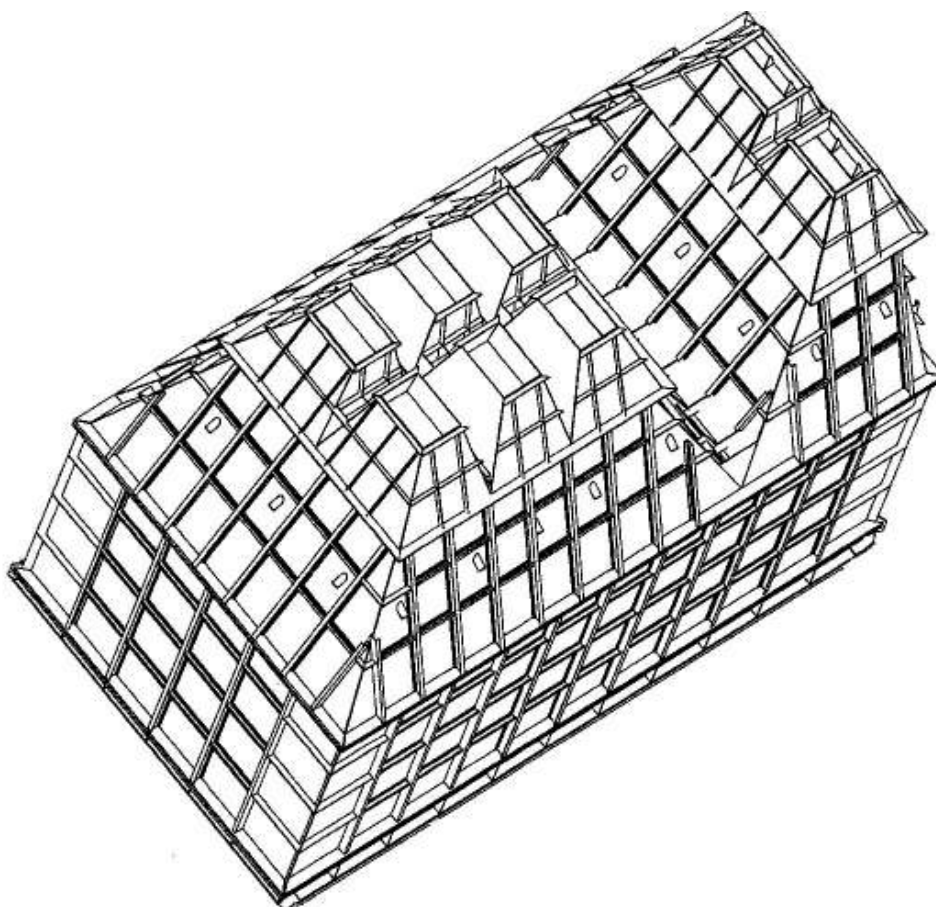
Obrázek 1 - Silo, celkový pohled [1]

Plnění zásobníku je ve vrchní části a vyprazdňování ( gravitační ) ve spodní části. Skládá se ze tří částí. První část je svislá komora zásobníku, jenž tvoří hlavní prostor pro skladování uhlí. Druhá část jsou dvě komory zásobníku ve tvaru komolých jehlanů. Tyto komolé jehlany nejsou stejně velké a nedělí zásobník na půl. Jehlany přechází poté do třetí části zásobníku a tou je výsypka. Výsypka je tvořena soustavou 8 stejně velkých jehlanovitých výsypek. Prvních šest výsypek připadá na první komolý jehlan a zbylé dvě na druhý.



Zásobník je svařen z plechů různých tloušťek. Komora zásobníku je z plechu tloušťky 10mm a výsypky z plechů tloušťky 8mm. Celý zásobník je vyztužen soustavou profilů I, U a plechů různých tloušťek. Na přechodu mezi svislou částí komory a šikmou částí komory je po obvodu zásobníku přivařen límec, který je vytvořen ze dnou profilů U svařených dohromady. Tento límec se také nachází ve vrchní části komory. Mezi těmito límcemi je zásobník vyztužen v horizontálním směru profily U a ve vertikálním směru profily I. Nad vrchním límcem je ve vertikálním směru zásobník vyztužen místo profilů typu I, plechy tloušťky 8mm. Rohy komory jsou vyztuženy plechy tloušťky 14mm, na ty navazují v horizontálním směru plechy o tloušťce 8mm, které dále navazují na výztuhy U profilu. Takto je vyztužena komora i v šikmé části komory zásobníku. Všechny tyto výztuhy jsou navařeny na vnější straně zásobníků. Další přídatné výztuhy se nachází v místech mezi dvěma šikmými částmi komor. Zde je přivařena soustava plechů spojených dohromady horizontálně umístěným profilem I.

Výsypky jsou vyztuženy pouze plechy různých tloušťek. Plechy se nacházejí jak v horizontálním směru tak vertikálním. Také mezi jednotlivými výsypkami jsou použity plechy jako výztuhy.



Obrázek 2- Silo, pohled ze spodu [1]

## 1.2. Stanovení typu zásobníku

Před začátkem výpočtů je zapotřebí stanovit typ zásobníku. Podle výšky se zásobníky dělí na nehluboké – bunkry a hlubinné – sila.

Pro určení typu použijí poměr z normy ČSN 73 5570 viz [2].

$$z \geq \frac{A}{f_w \cdot O \cdot k}$$

kde  $z$  je hloubka zásobníku

$A$  je plocha průřezu zásobníku (  $66\text{m}^2$  )

$f_w$  je tzv. součinitel tření mezi stěnou a materiálem  $f_w = \tan(\Phi) = \tan(35,7) = 0,719$

kde  $\Phi$  je úhel tření na stěnu zásobníku

$k$  je součinitel bočního napětí  $k = \frac{1 - \sin(\phi)}{1 + \sin(\phi)} = \frac{1 - \sin(20)}{1 + \sin(20)} = 0,49$

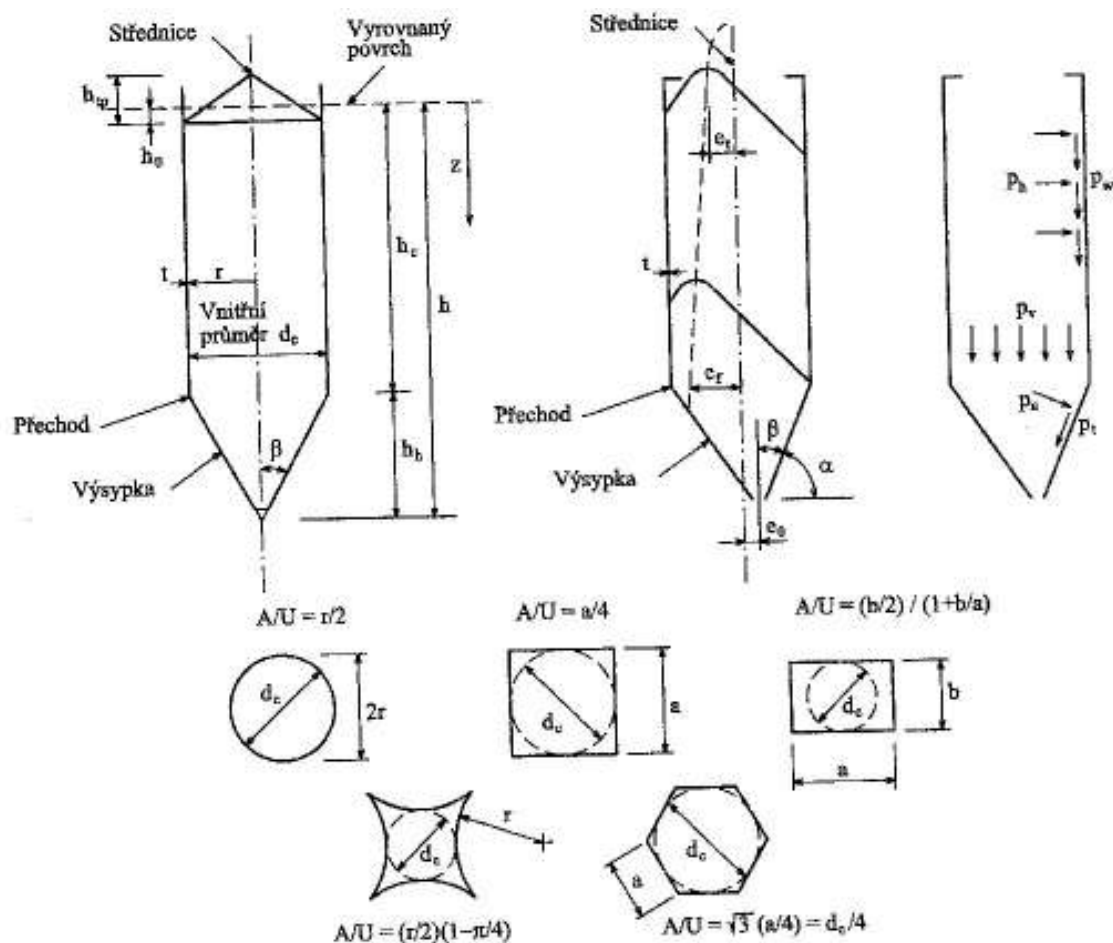
kde  $\phi$  je úhel vnitřního tření materiálu

$O$  je obvod zásobníku (  $34\text{m}$  )

Hodnoty součinitelů  $\Phi$  a  $\phi$  jsou převzaty z normy ČSN 73 5570.

Po dosazení do výše uvedeného vzorce bude hodnota  $z = 9 > 5,5$  to znamená, že se jedná o zásobník hlubinný.

Pro přesnější určení typu hlubinného zásobníku jsem použil normu ČSN EN 1991-1-4 viz [2]. Ta říká, že pro zatížení zásobníků platí závislosti uvedené obrázku 3. Zde zatížení odpovídá zásobníkům plněným bez rázových účinků materiálem, jehož částice nejsou větší než  $0,003 d_c$ , jenž volně teče a rozměry zásobníků jsou v mezích:  $(h_b/d_c) < 10$ ;  $h_b < 100\text{m}$ ;  $d_c < 60\text{m}$



Obrázek. 3 – Tvary zásobníků, rozměry a označení složek zatížení [3]

Pro náš zásobník jsem určil, že platí poměr  $(h/d_c) \geq 2,0$ ,

kde  $h$  je výška zásobníku

$d_c$  je tzv. hydraulický poloměr (poměr plochy průřezu a obvodu zásobníku).

Jedná se o zásobník štíhlý.

### 1.3. Teoretický průběh tlaků od sypkých hmot

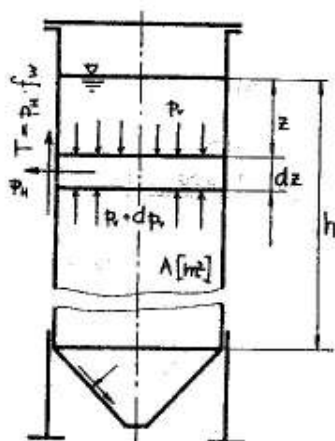
Jelikož se jedná o zásobník na hnědé uhlí což je látka sypká, je potřeba zavést předpoklady řešení viz [1].

- sypký materiál v zásobníku tvoří homogenní spojité prostředí
- vzniklá napětí v sypkém materiálu mohou být pouze tlaková a smyková, nebo jejich kombinace.
- částice materiálu jsou dostatečně pevné a při namáhání nedochází k plastické nebo jiné deformaci.

V zásobníku musím stanovit vertikální a horizontální průběh tlaku. Jelikož je můj zásobník hlubinný nemůžeme počítat vertikální tlak od materiálu jako hydrostatický tlak, jenž se používá při výpočtu nehlubokých zásobníků ( bunkry ). Je to dáno tím, že u hlubinných zásobníků se významně projevuje vliv tření o svislé stěny zásobníku. Tím se část tíhy náplně vlivem tření přenáší přímo na stěny zásobníku. Pro další výpočty je třeba zavést další předpoklady:

- tlak v průřezu je rovnoměrně rozdělen
- v celém objemu je objemová ( sypná ) hmotnost stejná, a tím i mezerovitost je konstantní
- součinitel bočního napětí ( aktivního tlaku ) je v celém objemu konstantní
- předpokládá se, že na stěně zásobníku, je právě mezní stav napjatosti.

Pro odvození vzorce pro výpočet vertikálního tlaku v hlubinném zásobníku se vychází z následujícího obrázku:



Obrázek. 4 – Obrázek pro odvození tlaků v zásobníku [2]

- $A$  [ m<sup>2</sup> ]    příčný průřez komory zásobníku  
 $O$  [ m ]    vnitřní obvod komory zásobníku  
 $f_w$     součinitel tření mezi stěnou a materiálem  
 $\gamma$  [ N.m<sup>-3</sup> ] objemová tíha náplně,  $\gamma = \rho' \cdot g$   
 $\rho'$  [ kg.m<sup>-3</sup> ] objemová sypaná hmotnost  
 $p_v$  [ N.m<sup>-2</sup> ] vertikální tlak  
 $p_H$  [ N.m<sup>-2</sup> ] horizontální tlak  
 $T$  [ N ]    třecí síla  
 $z$  [ m ]    vzdálenost od hladiny materiálu  
 $h$  [ m ]    výška komory zásobníku.

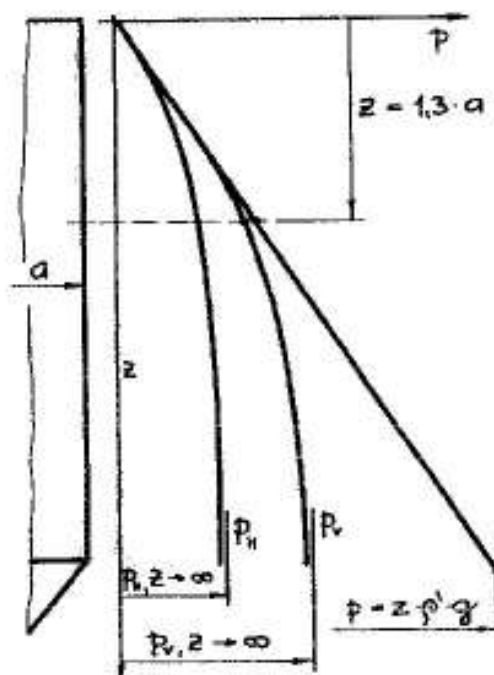
Odvození rovnice je převzato z [2].

Rovnice pro vodorovný průběh tlaku:

$$p_v = \frac{\gamma \cdot Rh}{f_w \cdot k} \cdot \left( 1 - e^{\frac{-z \cdot f_w \cdot k}{Rh}} \right)$$

Horizontální tlak se vypočte jako vertikální tlak vynásobený součinitelem bočního napětí  $k$

$$p_h = p_v \cdot k$$



Obrázek. 5 – Průběh tlaků v hlubinném zásobníku [2]

Tyto rovnice se také nazývají rovnicemi Janssenovými ( podle jejich autora ) a lze z nich stanovit hodnoty vertikálního a horizontálního tlaku v libovolné hloubce. Průběh tlaků bude odlišný od průběhu hydrostatického tlaku pro fiktivní kapalinu o hustotě  $\rho'$  jak ukazuje předešlý obrázek. Odvozené rovnice jsou totožné s rovnicemi, které uvádí ČSN 73 5570. Snadno jde odvodit viz [2], že pro  $z \rightarrow \infty$  dosáhnou obě hodnoty tlaků limitních hodnot, pro které platí:

$$p_{v\infty} = \frac{\gamma \cdot Rh}{f_w \cdot k} = konst.$$

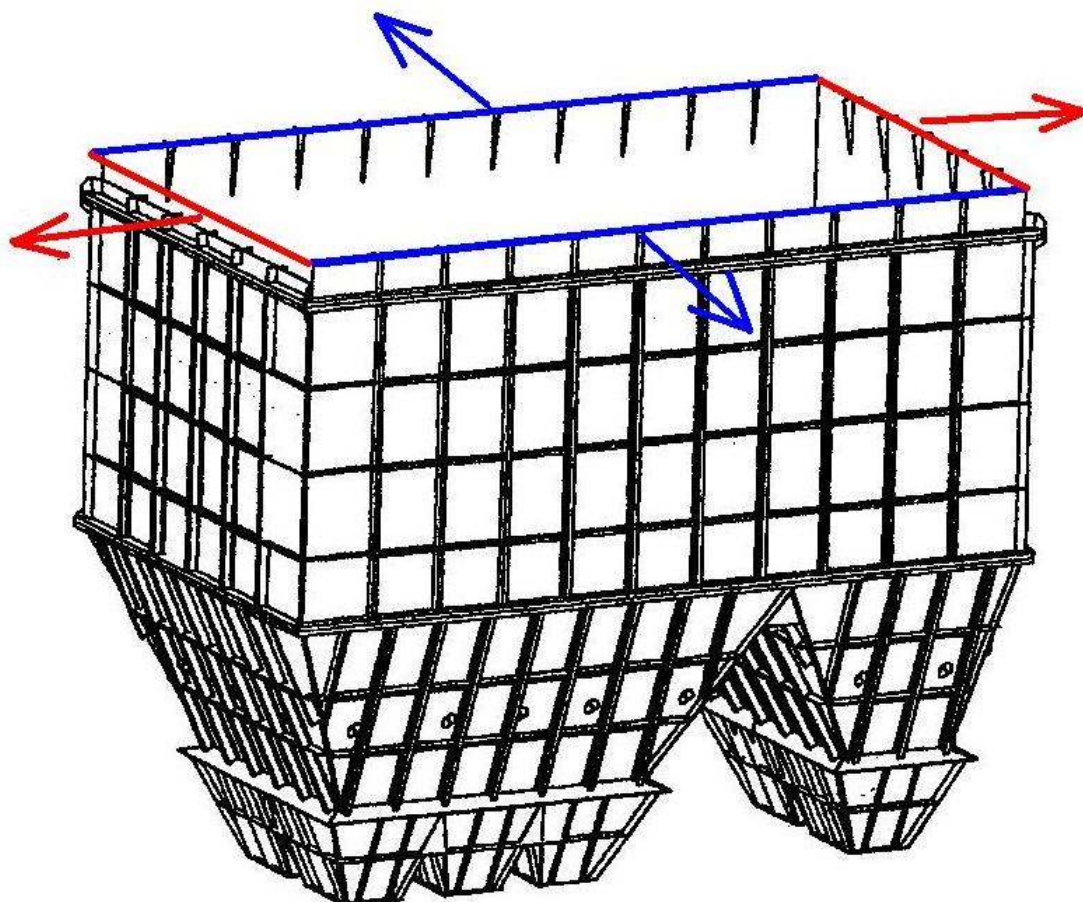
$$p_{h\infty} = \frac{\gamma \cdot Rh}{f_w} = konst.$$

Všechny vypočtené tlaky se musí vynásobit dílčím součinitelem zatížení 1,5. Velikost koeficientu je převzata z [3].

Po vypočtení tlaků je třeba provést kontrolu, zda tíhová síla uhlí, odpovídá součtu svislých složek sil od vypočtených tlaků na stěny zásobníku. Pokud se tyto hodnoty liší je třeba upravit dílčí součinitel zatížení tak aby se tyto síly rovnaly.

#### 1.4. Cíl práce

Cílem mé bakalářské práce je určit vodorovné reakce, které vzniknou na horním okraji komory zásobníku. Pak navrhnout konstrukční úpravy zásobníku tak, abych tyto reakce minimalizoval.



Obrázek. 6 – Místa kontroly reakcí





Pro vypočtení samotných tlaku si jsem si nejdříve musel spočítat ostatní koeficienty.

$\rho'$  je podle normy ČSN 75 5570 pro hnědé uhlí  $1250 \text{ kg/m}^3$

$$\gamma = \rho' \cdot g = 1250 \cdot 9,81 = 12260 \text{ N/m}^3$$

$$k = 0,49$$

$$f_w = 0,719$$

Tyto koeficienty poté dosadím do Janssenových rovnic a vypočtu hodnoty tlaků v určených místech. Místo 1 považuji za začátek zatížení a proto v tomto místě určuji hodnotu tlaku nulovou. Pro místa 2 –42 jsem použil Janssenovy rovnice pro libovolnou hloubku. V místě 5 jsem ovšem musel použít rovnice pro  $z \rightarrow \infty$ , tím jsem simuloval případné uzavření výsypek.

Po vypočtení tlaků jsem provedl kontrolu shody sil vyvozených od hmotností uhlí a sil z vypočtených tlaků. Tyto síly se mi nerovnaly a tudíž jsem musel upravit dílčí součinitel zatížení na hodnotu 1,7 a tlaky přepočítat.

Vypočtené hodnoty tlaků s novým koeficientem zatížení  $p_v$  a  $p_H$

Typ tlaku/ místo výpočtu	$p_v$ [ MPa ]	$p_H$ [ MPa ]
1	0	0
2	0,020067	0,009839
31	0,061576	0,030190
32	0,058305	0,028586
33	0,048427	0,023743
41	0,054618	0,026779
42	0,024380	0,011960
5	0,012182	0,005973

Pro pozdější použití musím tyto tlaky vektorově sečíst.

$$\text{příklad výpočtu: } p_1 = \sqrt{p_{v1}^2 + p_{h1}^2}$$

místo tlaku	p [ MPa]
1	0
2	0,022349
31	0,068579
32	0,064936
33	0,052934
41	0,060830
42	0,027156
5	0,013568

## 2.2. Určení sil od tlaku hnědého uhlí

Vzhledem k tomu, jak bude tlak sypké hmoty aplikován na výpočtový model, je potřeba z vypočtených tlaků určit velikosti sil, které tyto tlaky vyvozují na stěny zásobníku. Velikost síly se určí podle jednoduchého vzorce.

$$F = \frac{p_1 + p_2}{2} \cdot A$$

kde A je plocha na kterou síla působí

$p_1$  a  $p_2$  jsou tlak na začátku a konci plochy A

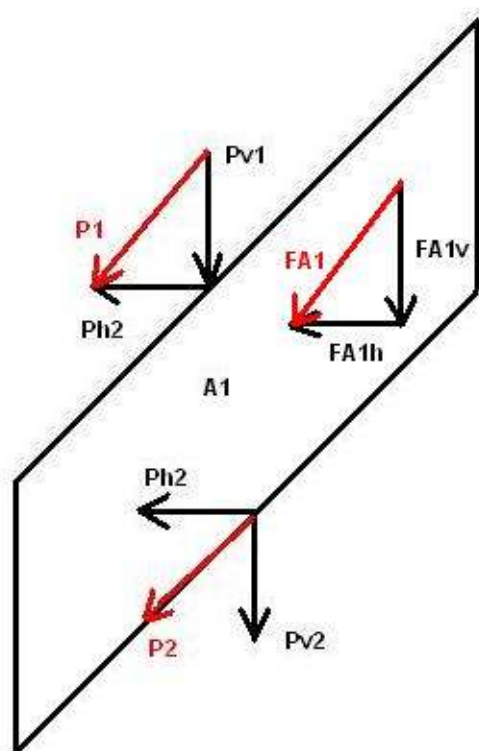
Síly musím spočítat zvlášť od vertikálních i horizontálních tlaků a poté je opět vektorově sečíst. Plochy jsem rozdělil tak, aby odpovídaly částem zásobníku mezi dvěma určitými tlaky.

příklad výpočtu:

$$A1 = 6m \cdot 1,058m = 6,348m^2$$

$$FA1v = \frac{pv1 + pv2}{2} \cdot A1 \quad FA1h = \frac{ph1 + ph2}{2} \cdot A1$$

$$FA1 = \sqrt{FA1v^2 + FA1h^2}$$



Obrátek. 8 – Příklad výpočtů tlaků a sil na ploše A1

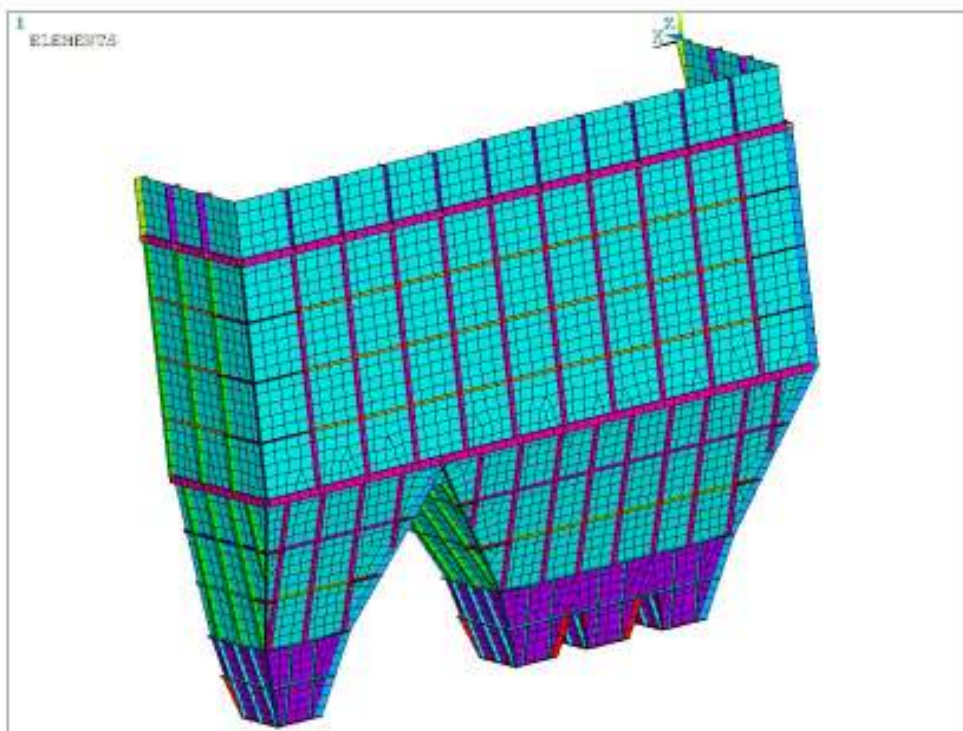
Vypočtené velikosti sil na jednotlivé plochy:

Síla na plochu	F [ N ]
FA1	70 937
FA2	130 050
FA3	70 937
FA4	865 820
FA5	1 587 300
FA6	865 820
FA7	516 510
FA8	628 180
FA9	580 420
FA10	370 690
FA11	205 840
FA12	392 700
FA13	22 019
FA14	18 025
FA15	16 081

## 2.3. Tvorba výpočtového modelu

### 2.3.1. Tvorba geometrie

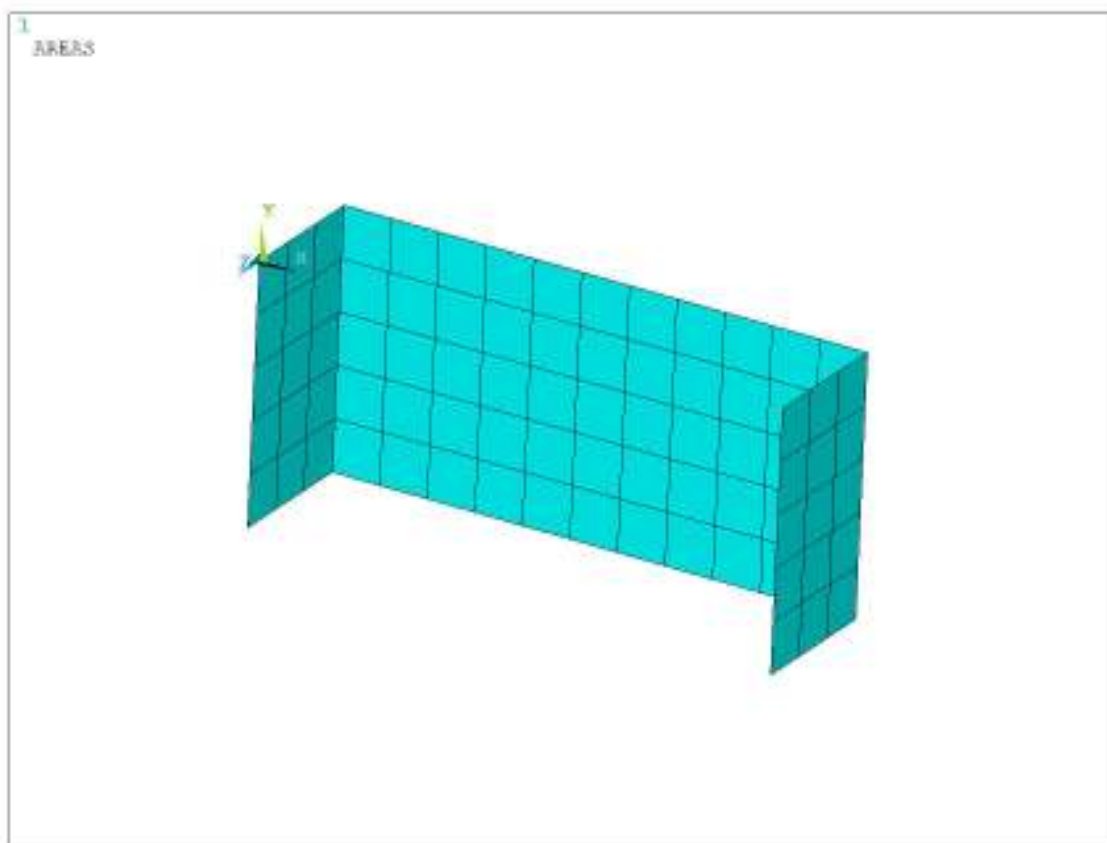
Výpočtový model zásobníku je vytvořen v prostředí SW ANSYS. Vymodelována je pouze polovina modelu. Symetrii mohu použít z důvodu symetrických okrajových podmínek a symetrické geometrie konstrukce. Všechny rovinné části jsou vymodelovány plochami, které jsou pak děleny na skořepinové prvky ( SHELL63 ). Výztuhy zásobníku ( I a U profily ) jsou vymodelovány jako čáry a diskretizovány prvky nosníkového typu ( BEAM4 ).



Obrázek. 9 – Model, celkový pohled

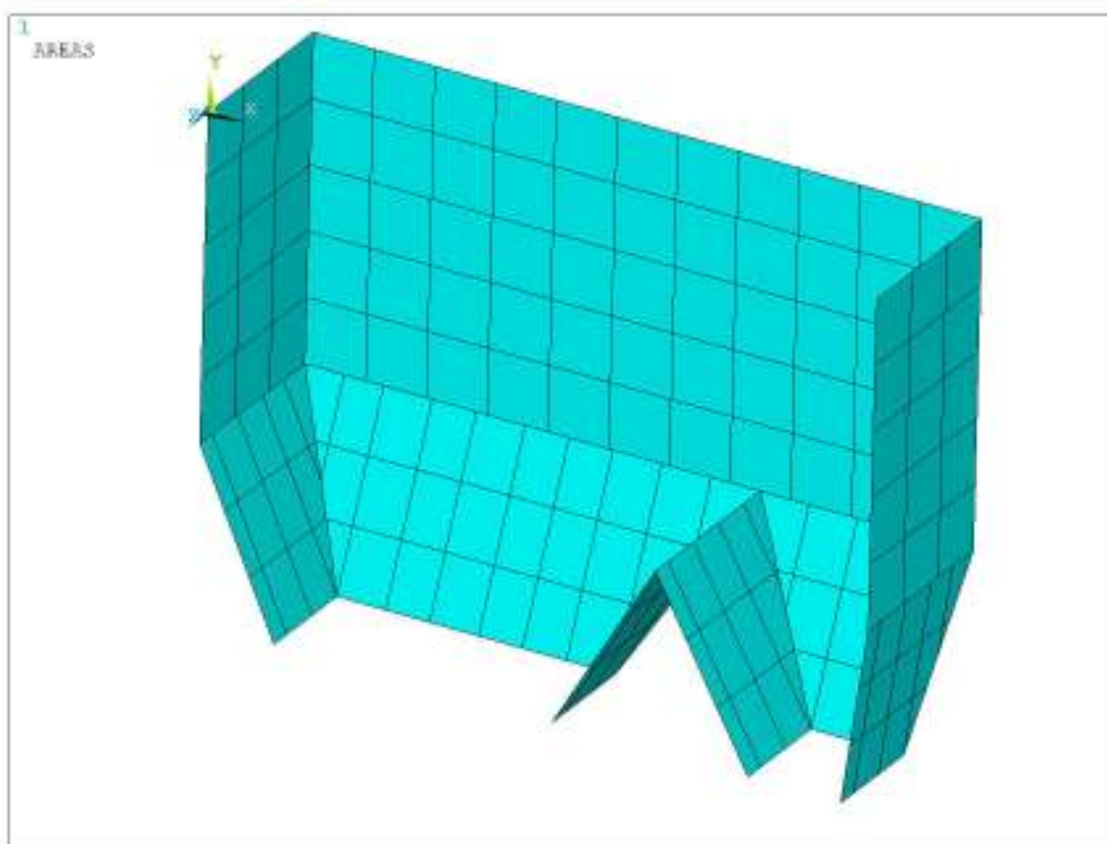
Orientaci modelu v souřadném systému jsem zvolil tak abych měl hloubku v záporném směru osy y, šířka je v záporném směru osy z a délka v kladném směru osy x. Nejdříve jsem modeloval základní tvar sila bez výztuh. Ovšem již dopředu jsem počítal s tím, že budu potřebovat čáry na které poté umístím nosníkové prvky ( BEAM4 ), které budou simulovat výztuhy. Proto jsem stěny sila vytvořil jako systém ploch a jejich šířka a délka odpovídají mezerám mezi jednotlivými výztuhami.

Komora zásobníku ( svislá část ): V bodě 0,0,0 jsem vytvořil bod ( keypoint ), který jsem poté nakopíroval tak abych dostal systém bodů, které jsem poté pospojoval čarami a z nich následně vytvořil plochy, které tvoří svislé stěny. Při tvorbě čar pro spodní plochy jsem pamatoval na to, že musí navazovat na plochy v šikmé části komory a tyto nemají stejné šířky a to z důvodu rozdílného rozdělení výztuh v této části. Proto jsem přidal body navíc, které odpovídají tomuto rozdělení výztuh a ty jsem zahrnul do tvorby ploch ve vrchní části.



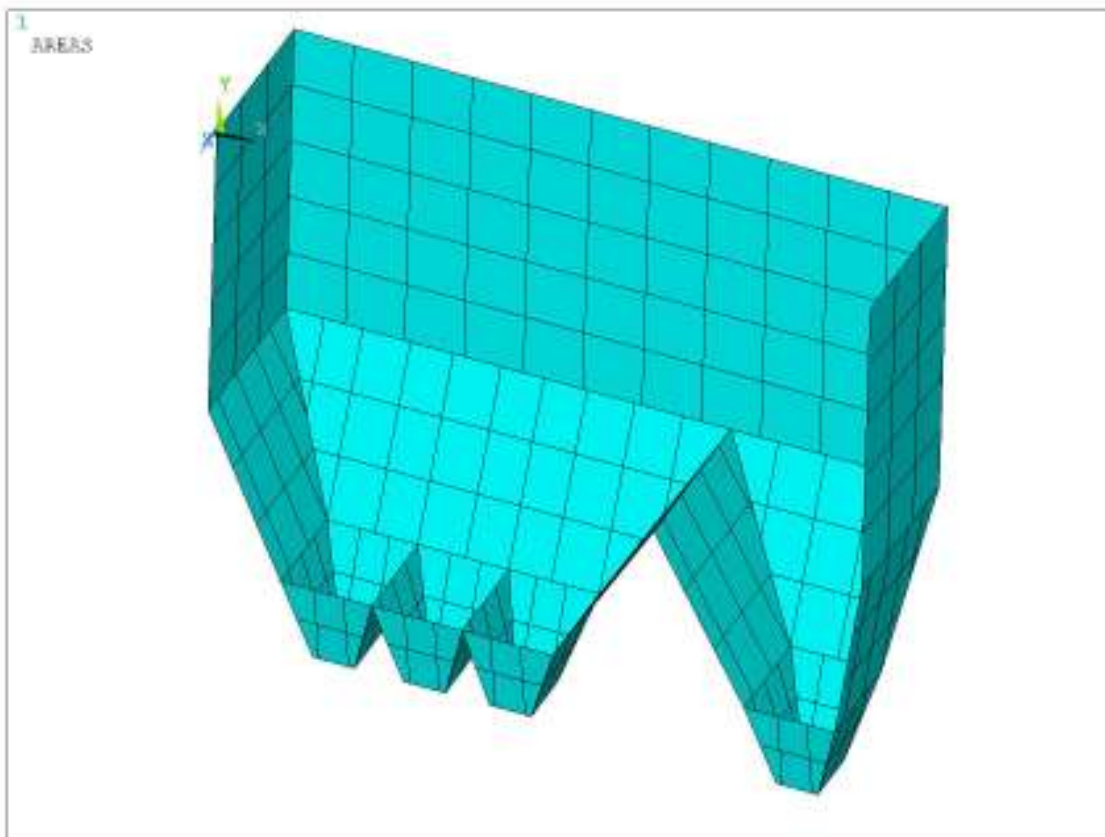
Obrázek.10 – Plochy svislé části zásobníku

Komora zásobníku ( šikmá část ): Zde jsem již nemohl použít obyčejné kopírování bodů a poté jejich spojení vzhledem k tomu, že by se velice těžko určovaly souřadnice těchto bodů. Proto jsem si vytvořil pouze body na přechodu mezi šikmou částí a výsypkami, kde jsem znal přesné souřadnice díky výkresové dokumentaci viz [1]. Tyto body jsem poté spojil svislými čarami, které budou součástí budoucích ploch. Následně jsem tyto čáry rozdělil pomocí pracovní roviny ve výškách horizontálních výztuh. Takto rozdělené čáry jsem spojil čarami horizontálním abych z nich následně vytvořil plochy šikmé části zásobníku.



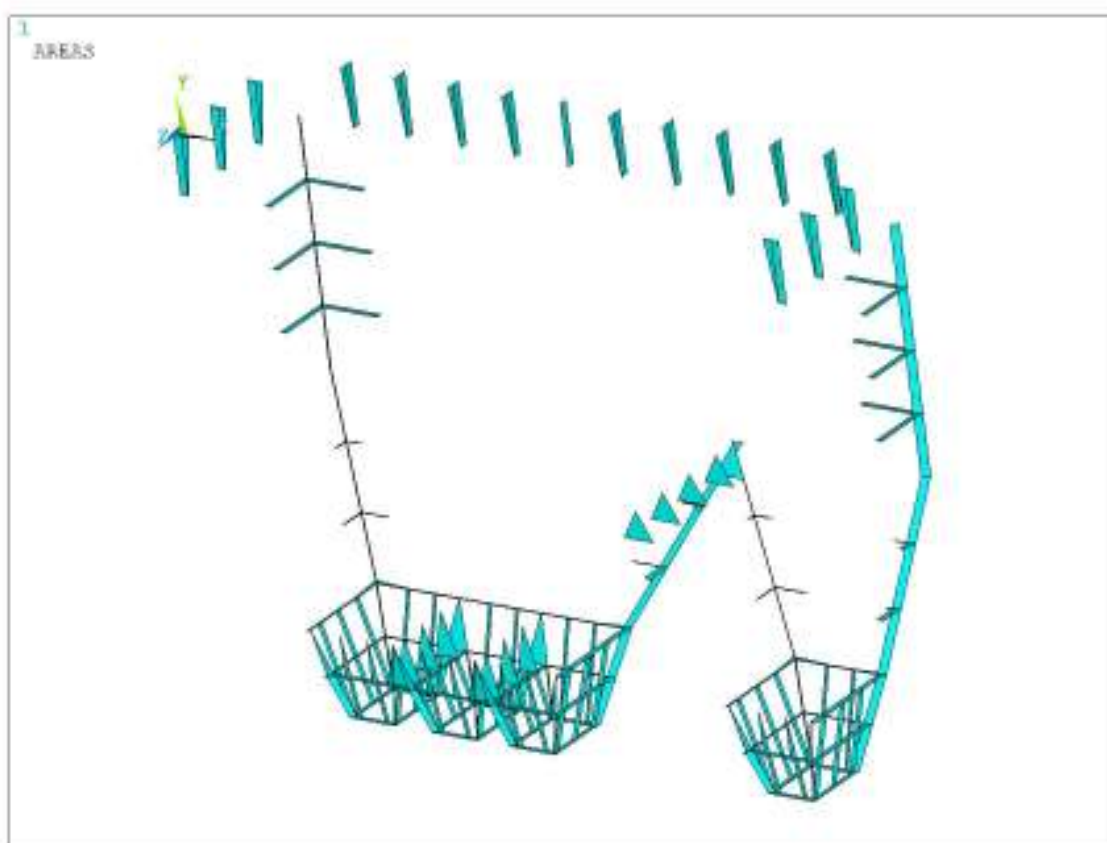
Obrázek. 11 – Plochy komory zásobníku

Výsypky: Tvorba výsypek byla velice podobná tvorbě šikmé části jediným rozdílem bylo, že čáry budoucích ploch nebudou použity pro nosníkové prvky , ale budou součástí ploch, které tvoří výztuhy vytvořeny z plechu.



Obrázek. 12 – Plochy zásobníku

Tvorba plechových výztuh: Na takto připravený základní tvar zásobníku jsem začal modelovat výztuhy tvořené plechy. Tvorba plechů na horní části byla jednoduchá pouze jsem nakopíroval body a z nich vytvořil plochy. Složitější byla tvorba plechových výztuh na šikmé části a výsypkách. Zde jsem musel opakovaně využívat funkci pro vytvoření vlastního koordinačního systému pomocí tří bodů abych zajistil správnou velikost a zároveň kolmost výztuh k šikmým plochám.



Obrázek. 13 – Systém plechových výztuh

Celkové údaje o modelu:

Počet bodů.....651

Počet čar.....1301

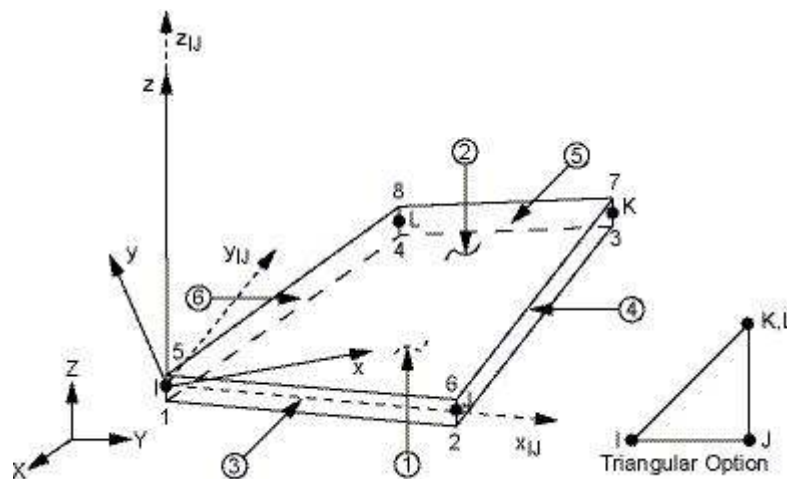
Počet ploch.....646



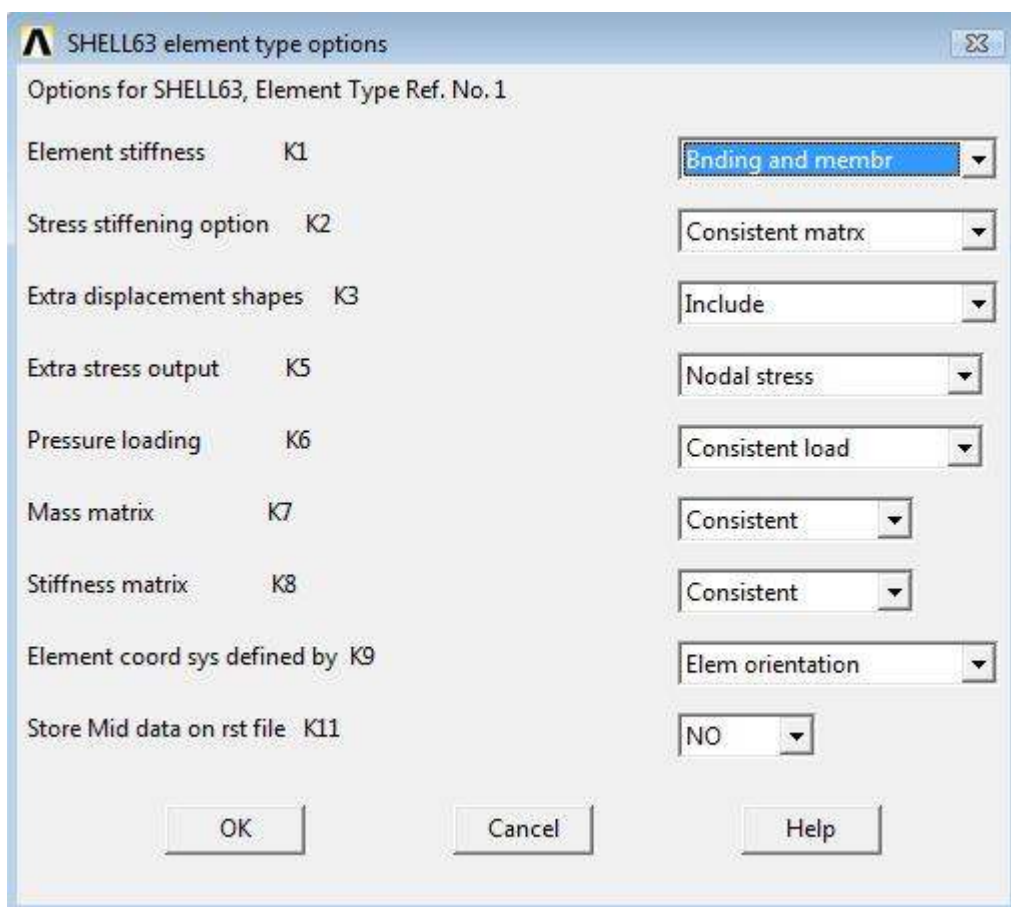
### 2.3.2 Použité prvky MKP

Skořepinový prvek ( SHELL63 ):

Jedná se o elastický skořepinový prvek. Má ohybové i membránové vlastnosti. Je dovoleno zatížení jak v rovině prvku tak i ve směru normálovém. Prvek má čtyři uzly a v každém 6 stupňů volnosti, posunutí ve směru osy x,y a z a rotaci okolo os x,y,z.



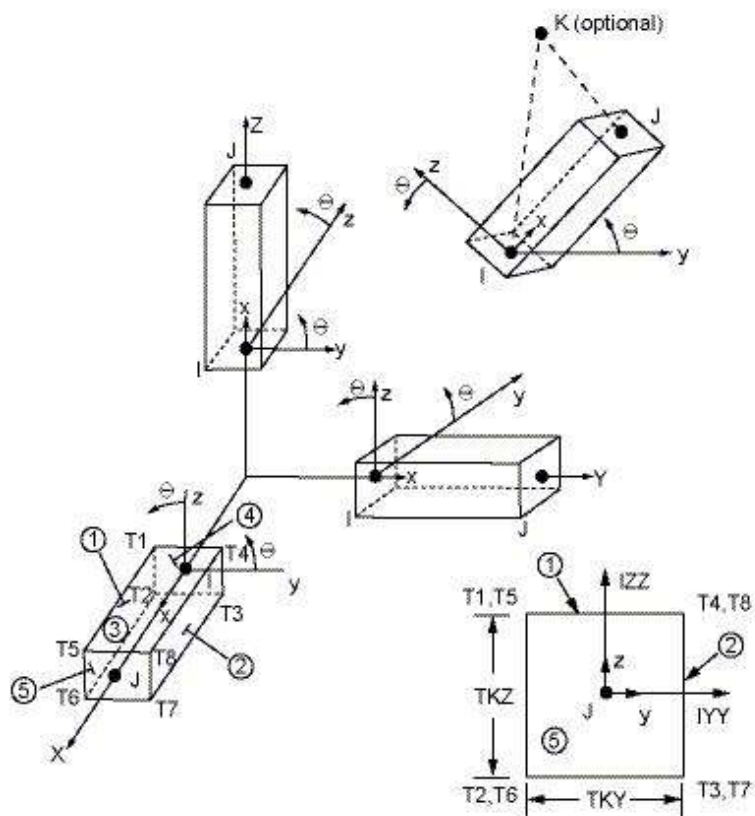
Obrázek 14 – Geometrie skořepinového prvku ( SHELL63 ) [4]



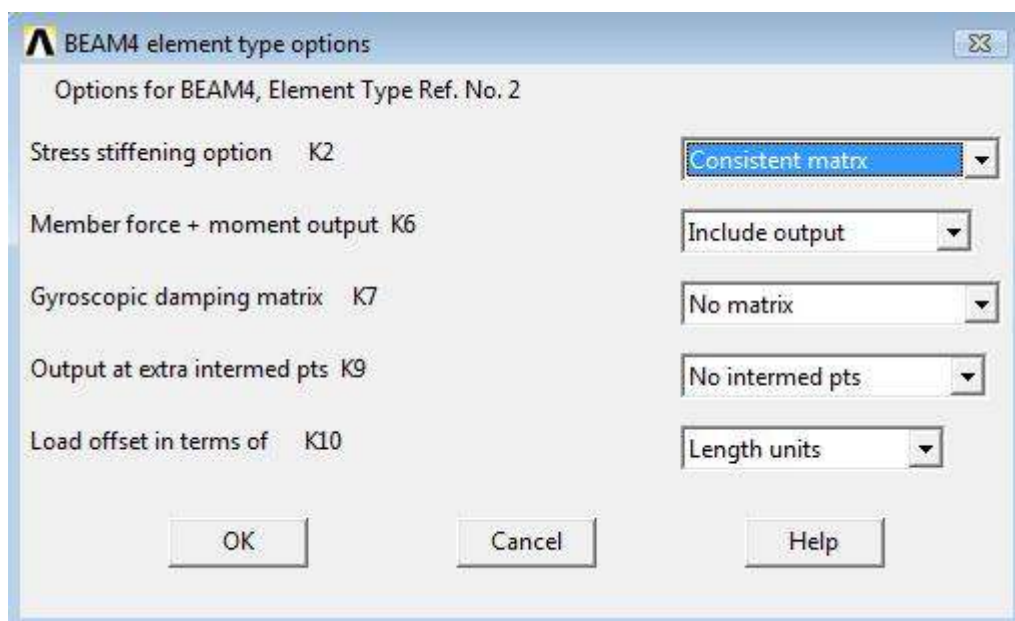
Obrázek 15 – Nastavení skořepinového prvku ( SHELL63 ) v programu ANSYS

Nosníkový prvek ( BEAM4 ):

Jedná se o 3-D elastický nosníkový prvek. Prvek je možno zatížit, tahem, tlakem, krutem, ohybem. Prvek má dva uzly v každém 6 stupňů volnosti, posunutí ve směru osy x,y a z a rotaci okolo os x,y,z.



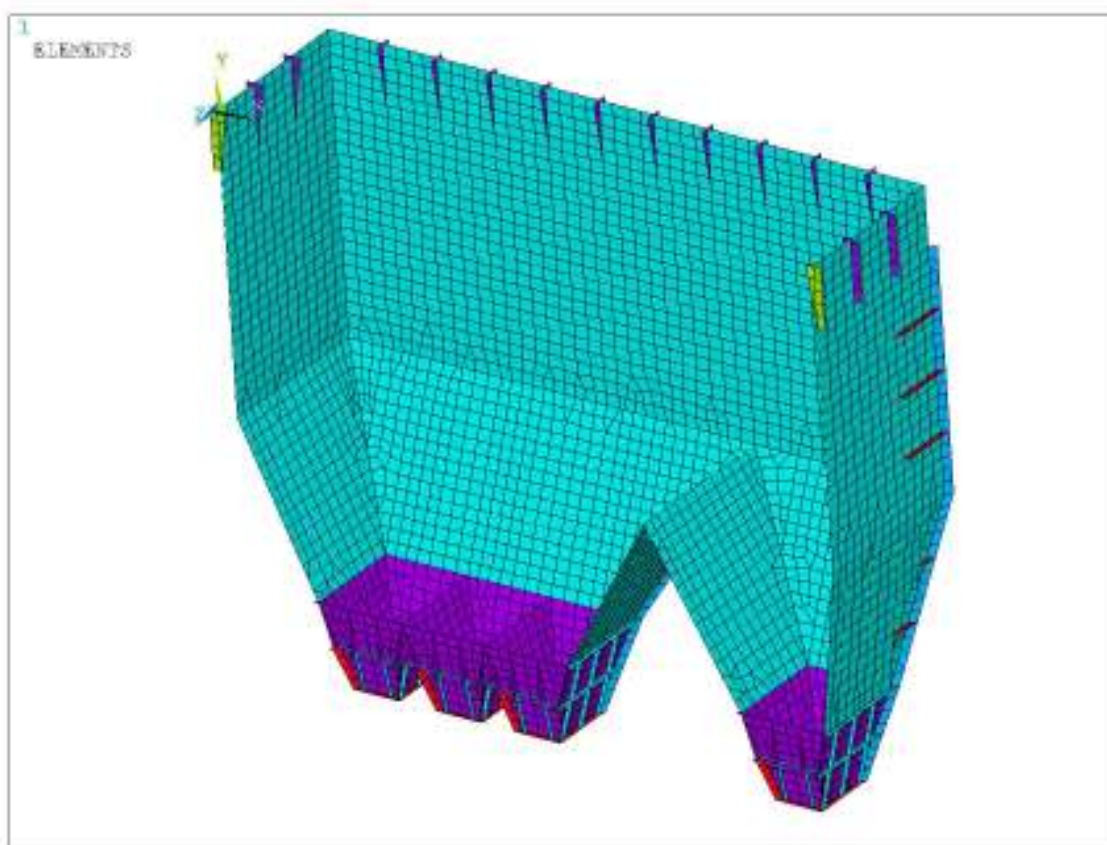
Obrázek 14 – Geometrie nosníkového prvku ( BEAM4 ) [4]



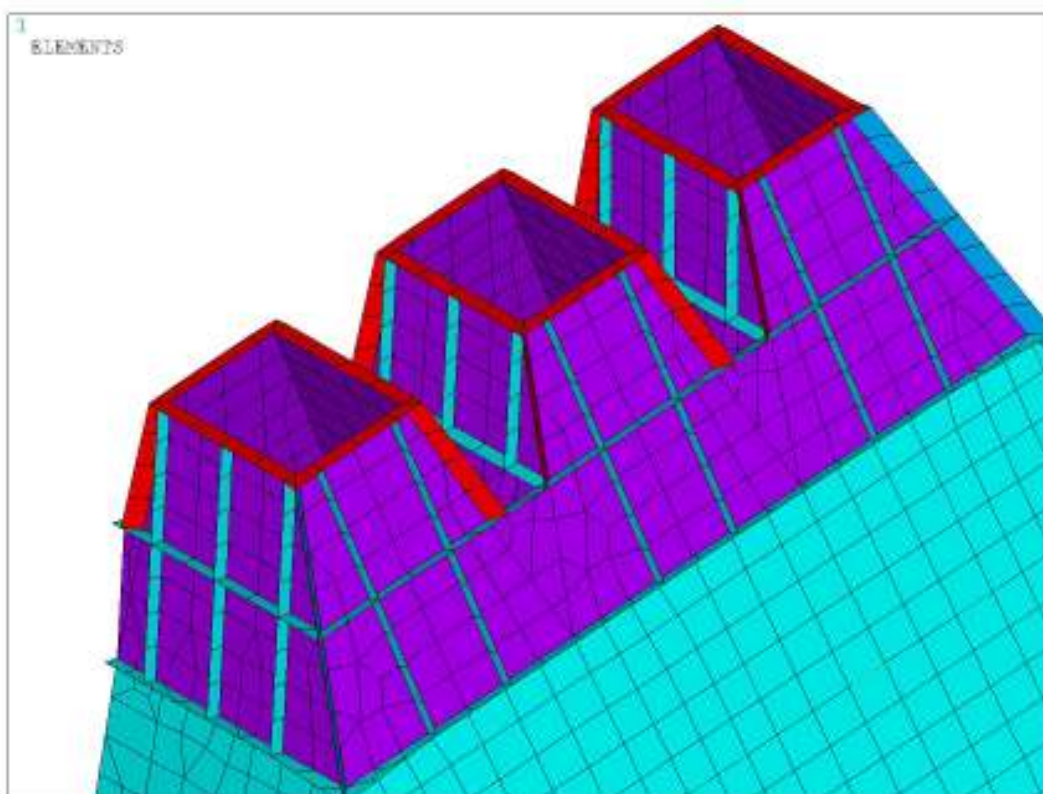
Obrázek 15 – Nastavení nosníkového prvku ( BEAM4 ) v programu ANSYS

### 2.3.3. Tvorba konečnoprvkového modelu

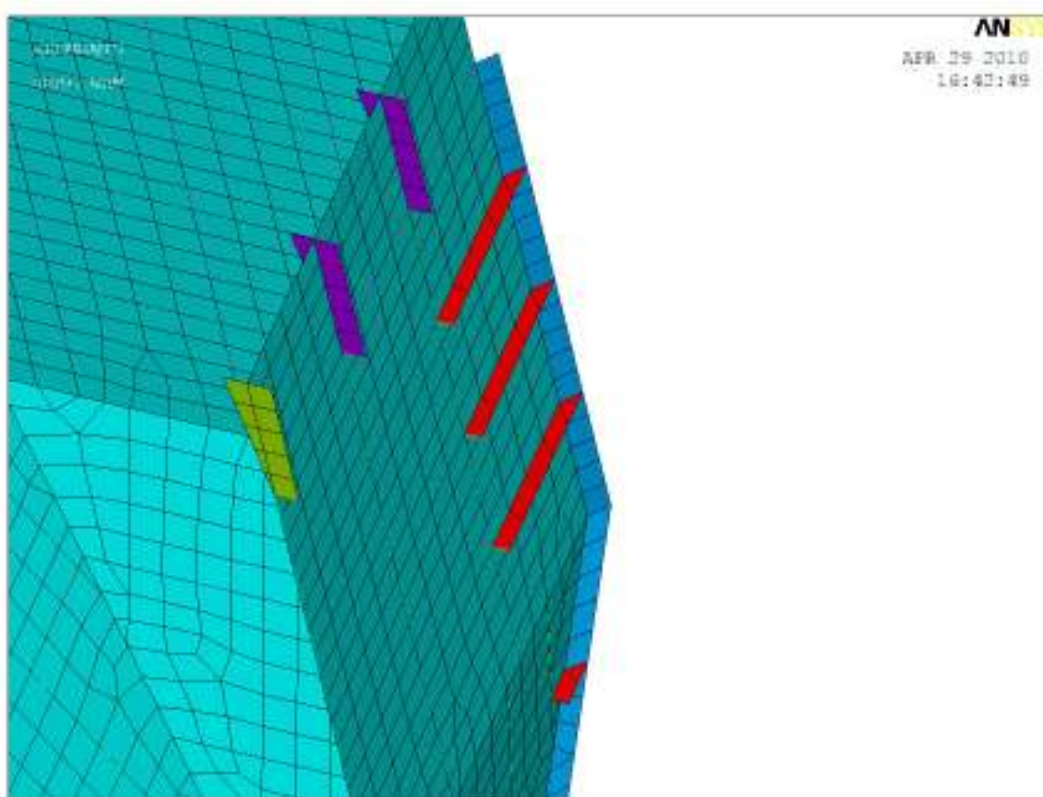
Z vytvořené geometrie byl realizován konečnoprvkový model s prvky skořepinovými ( SHELL63 ) a nosníkovými ( BEAM4 ). Nyní nadefinuji materiálové konstanty: hustotu  $\rho = 7,85 \times 10^{-9} \text{ t/mm}^3$ , modul pružnosti  $E = 2,1 \times 10^5 \text{ MPa}$ , Poissonovu konstantu  $\mu = 0,3$ . Nejdříve jsem vytvořil konečnoprvkovou síť na všech plochách. Vzhledem k tomu, že na zásobníku se vyskytují různé druhy tloušťek plechu musel jsem vytvořit různé reálné konstanty pro tyto tloušťky. Než jsem začal vytvářet síť konečných prvků nastavil jsem velikost elementů na 250mm. Při síťování horní části zásobníku jsem použil prvky čtyřúhelníkové ( quadrilateral ) a síť jsem nastavil jako mapovanou. Pro zbytek geometrie jsem použil také prvky čtyřúhelníkové, ale síť jsem nechal volnou a to z důvodu přechodů mezi svislou a šikmou částí komory a přechodu mezi šikmou částí a výsypkami, kde program nedovoluje použití mapované sítě ( plochy v těchto přechodech jsou tvořeny více jak 4 čarami a tyto čáry nejsou stejně velké ).



Obrázek. 16 – Konečnoprvkový model, plechy



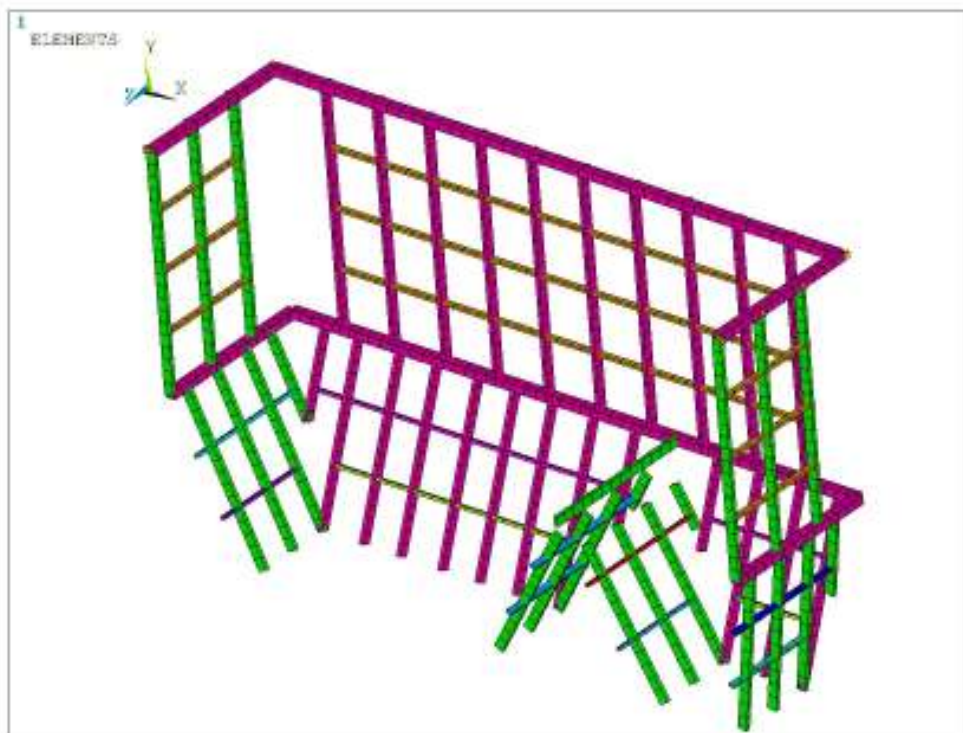
Obrázek. 17 – Konečnoprvkový model, detail výsypky



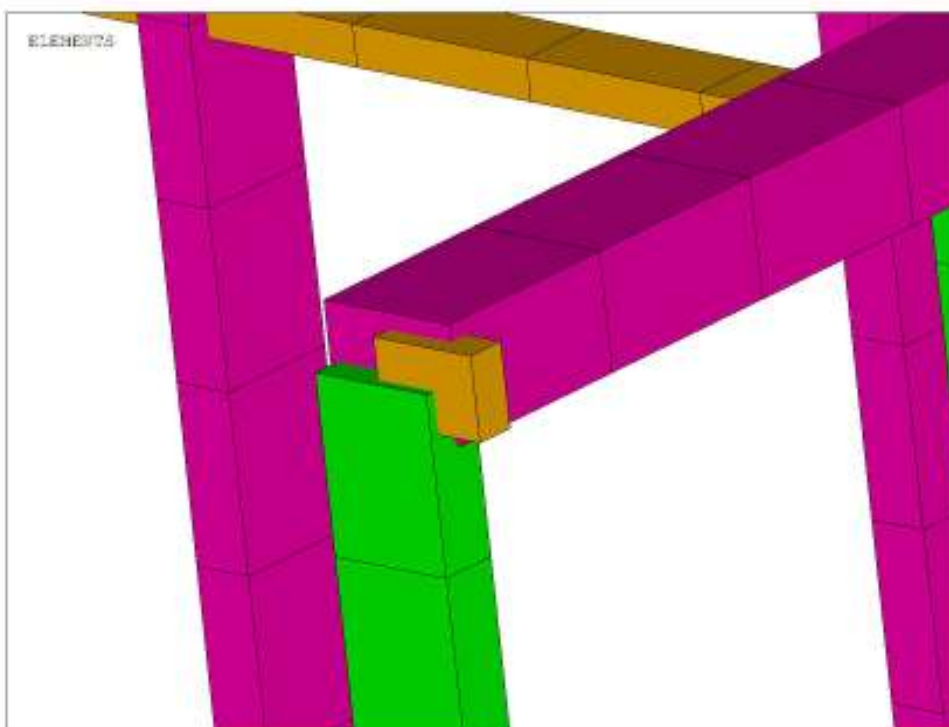
Obrázek. 18 - Konečnoprvkový model, detail komory zásobníku



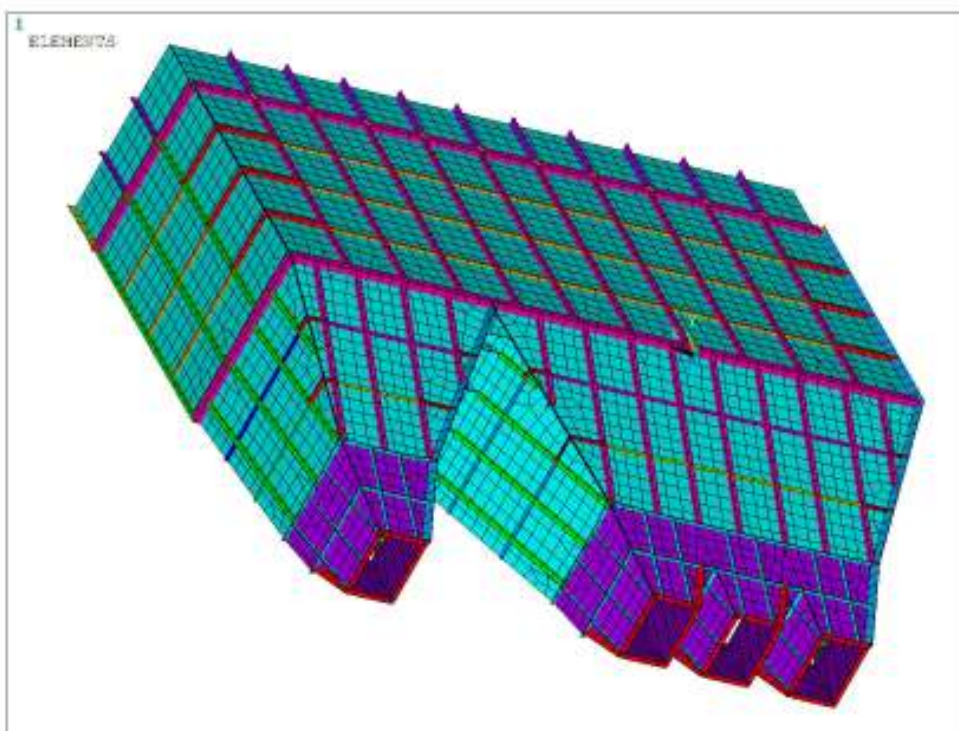
Tvorba výztuh I a U profilu: Pro každý profil jsem musel vytvořit zvlášť jednu reálnou konstantu. Navíc v případě svislých profilů I a U profilů na komoře jsem musel vytvořit další typ reálných konstant, abych zajistil správné natočení lokálních os prvků vůči stěnám zásobníku. S takto připravenými reálnými konstantami jsem poté vytvořil konečnoprvkovou síť pro všechny čáry, které odpovídají pozicím skutečných výztuh. Protože na skutečném zásobníku jsou výztuhy profilů I, U a plechové výztuhy svařeny, musel jsem toto také zajistit v modelu.



Obrázek. 19 – Konečnoprvkový systém výztuh profilů I a U



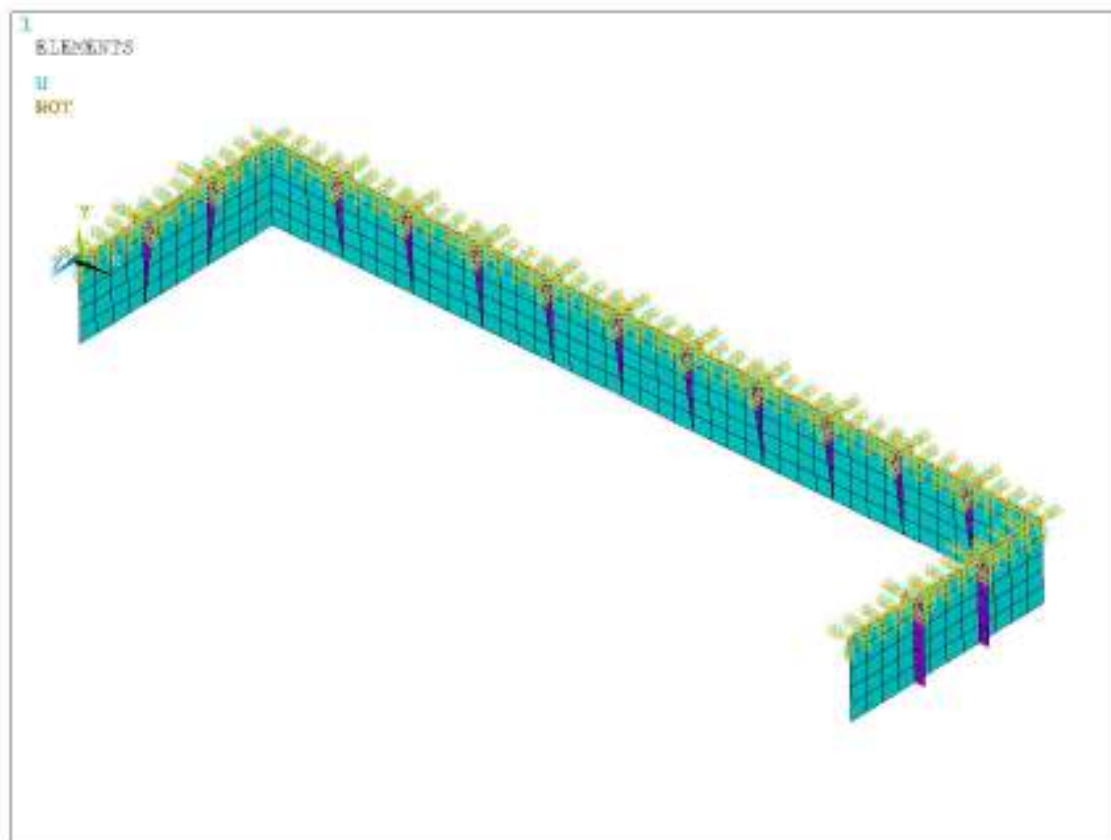
Obrázek. 20 – Detail spojení plechové výztuhy a profilu U



Obrázek 21 – Konečnoprvkový model, celkový pohled

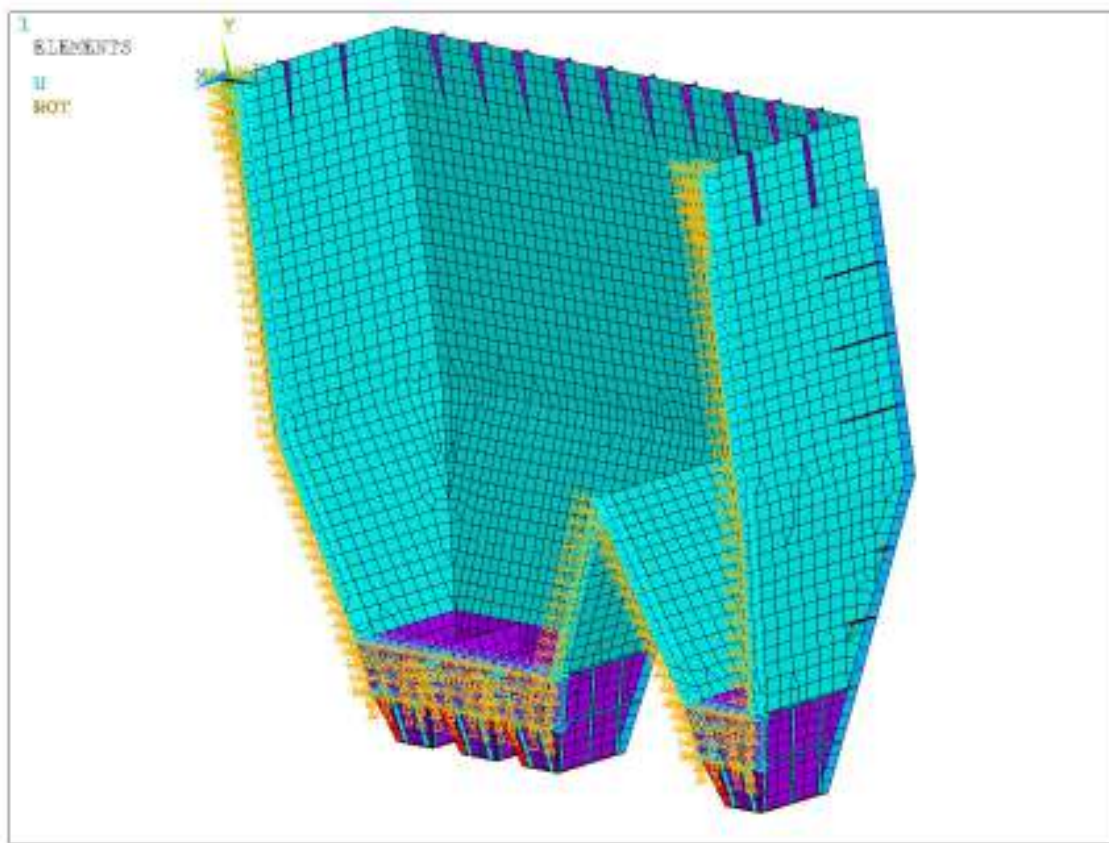
## 2.4. Okrajové podmínky

Při volbě okrajových podmínek jsem vycházel ze skutečnosti, že zásobník je v horní části přivařen k ocelové konstrukci. Uzlům nacházejícím se v hloubce  $y = 0$  jsem odebral posunutí ve všech směrech a natočení okolo všech os (vetknutí).



Obrázek 22 – Horní okraj zásobníku, vetknutí

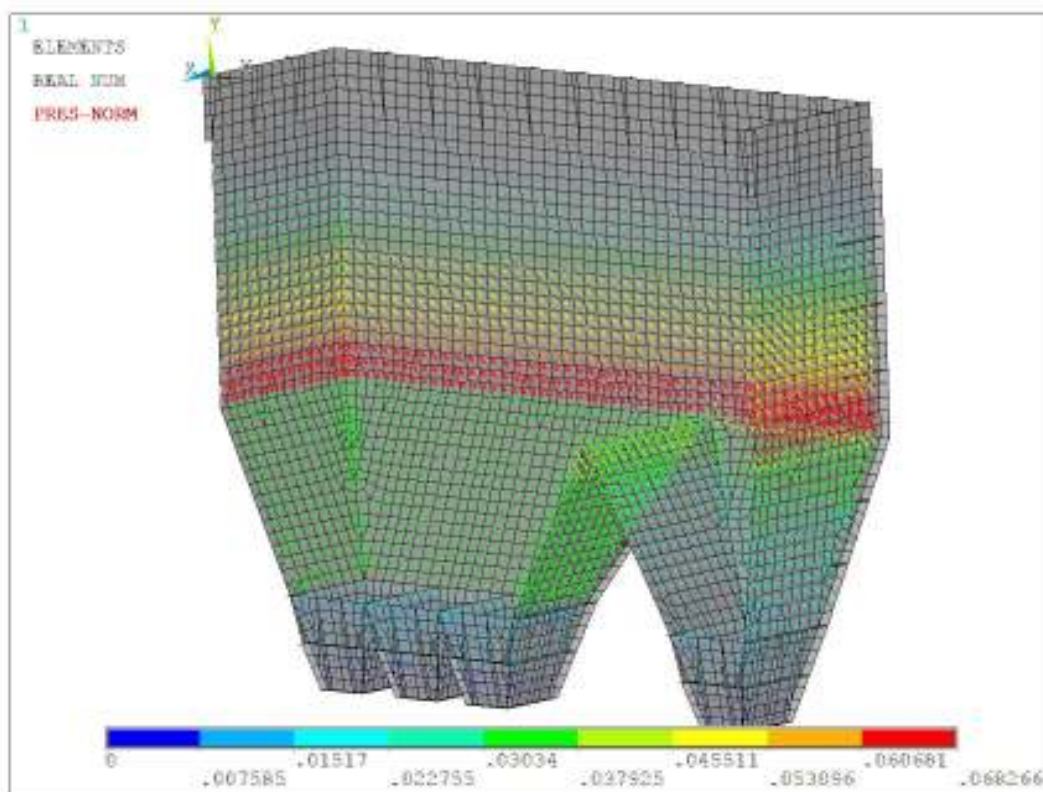
Jelikož jsem modeloval pouze jednu polovinu modelu, bylo třeba také definovat okrajové podmínky pro symetrii. Symetrii ve směru osy  $z$ , jsem definoval pro všechny uzly, které mají souřadnici  $z = 0$ .



Obrázek 23 – Nastavení symetrických okrajových podmínek

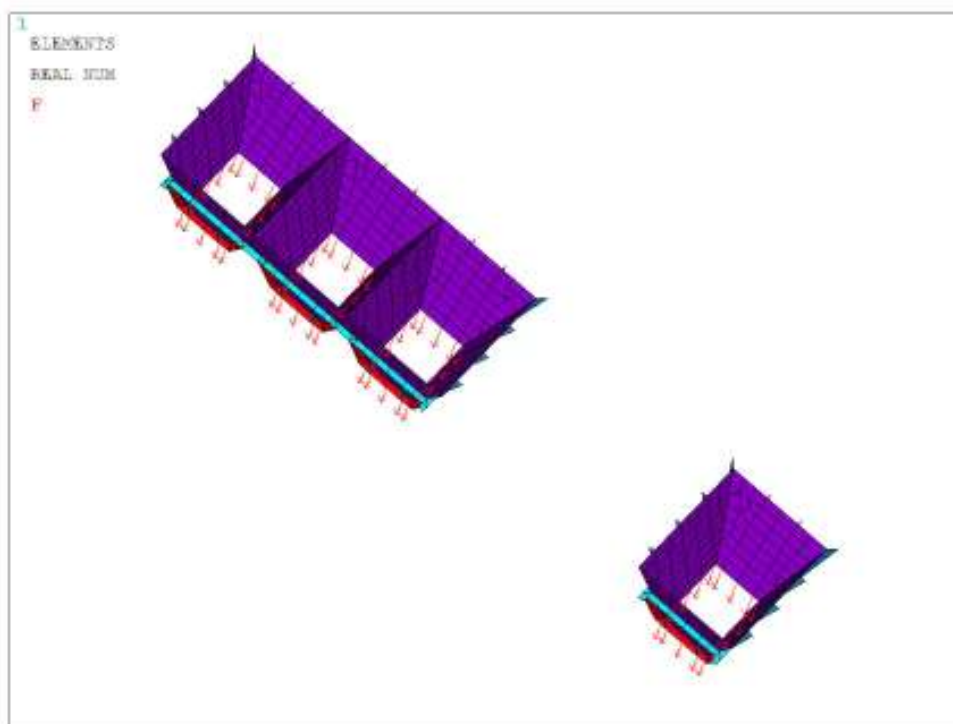
Aplikace tlakového zatížení: K aplikaci vypočtených tlaků jsem použil dvě makra. První pod názvem LIN\_TLAK [5] a druhý ZATI\_SH [5]. Abych mohl tyto makra použít, musel jsem si nejdříve vytvořit komponenty, které budou zahrnovat plochy na které se poté bude tlak aplikovat. Každá stěna komory a výsypek, je tvořena z jedné komponenty a to tak aby odpovídaly rozdělení podle míst, ve kterých jsou vypočteny jednotlivé složky tlaků. Komponenty jsem pojmenoval od A1 až A28. Před samotným začátkem aplikace tlaku jsem nejdříve spustil makro LIN\_TLAK. Makro slouží pro výpočet lineárního průběhu tlaku. Nejdříve zadám do makra dva tlaky mezi kterými chci tuto lineární závislost definovat a dále pak souřadnice y pro oba tlaky. Makro mi vypočte směrnici tlaku na jednotku délky. Nyní spustím makro ZATI\_SH, které aplikuje tlak pomocí složek výsledného vektoru síly. Pro úspěšné spuštění makra je třeba zadat název komponenty na kterou chceme tento tlak aplikovat, dále pak velikost síly která přísluší této komponentě a poslední údaj je pak směr vektoru dané síly v osách x, y, z. ( -1,1 nebo 0 ). Pomocí takto připravených maker, aplikuji tlak na všechny stěny zásobníku.





Obrázek 24 – Rozložení tlaků v zásobníku

Simulace zavření výsypek: Pro případ, že by se výsypky zavřely, musím přidat zatížení na dno výsypek. To přidám jako sílu rovnoměrně rozpočítanou na uzly, které tvoří spodní okraj výsypek.



Obrázek 25 – Síly na dno výsypek

Poslední okrajová podmínka kterou musím nastavit je vlastní tíha zásobníku. Tu nastavím tak, že zadám do programu zrychlení pro celý zásobník  $gy = 9810\text{mm/s}^2$

Celkové údaje o konečnoprvkovém modelu

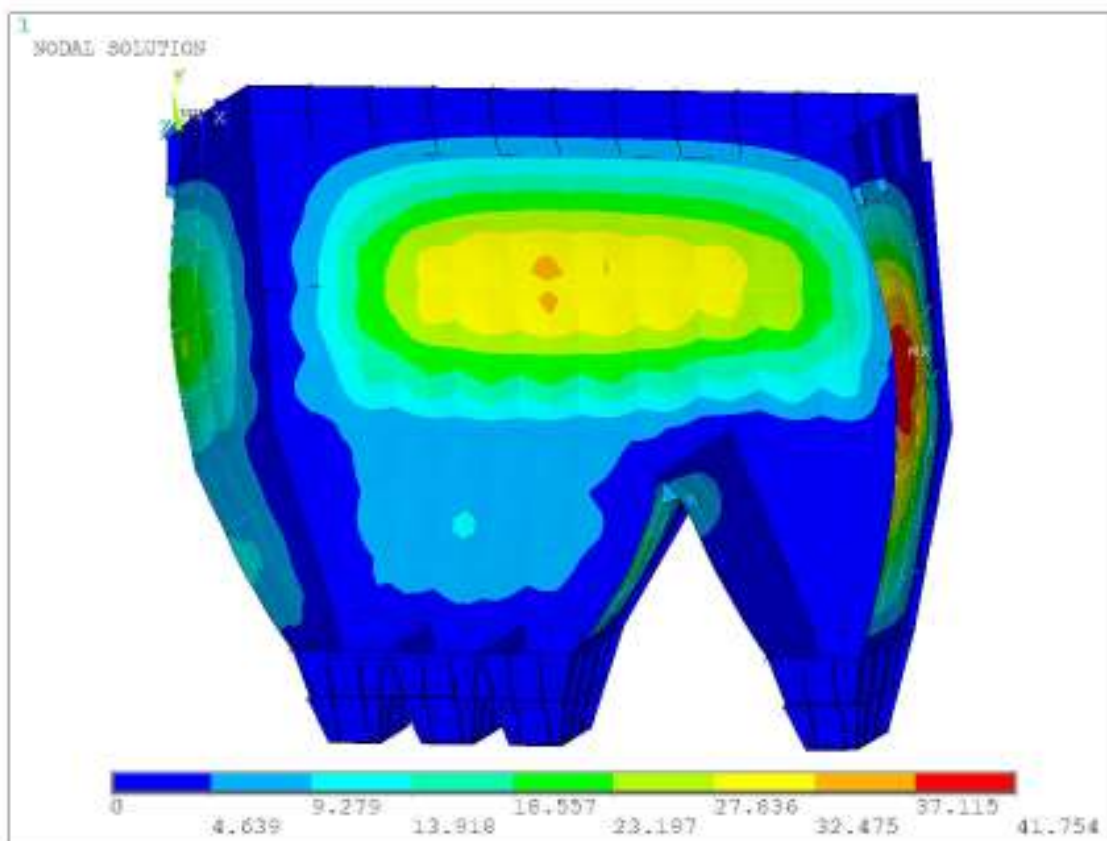
Počet uzlů.....4948

Počet elementů.....6224

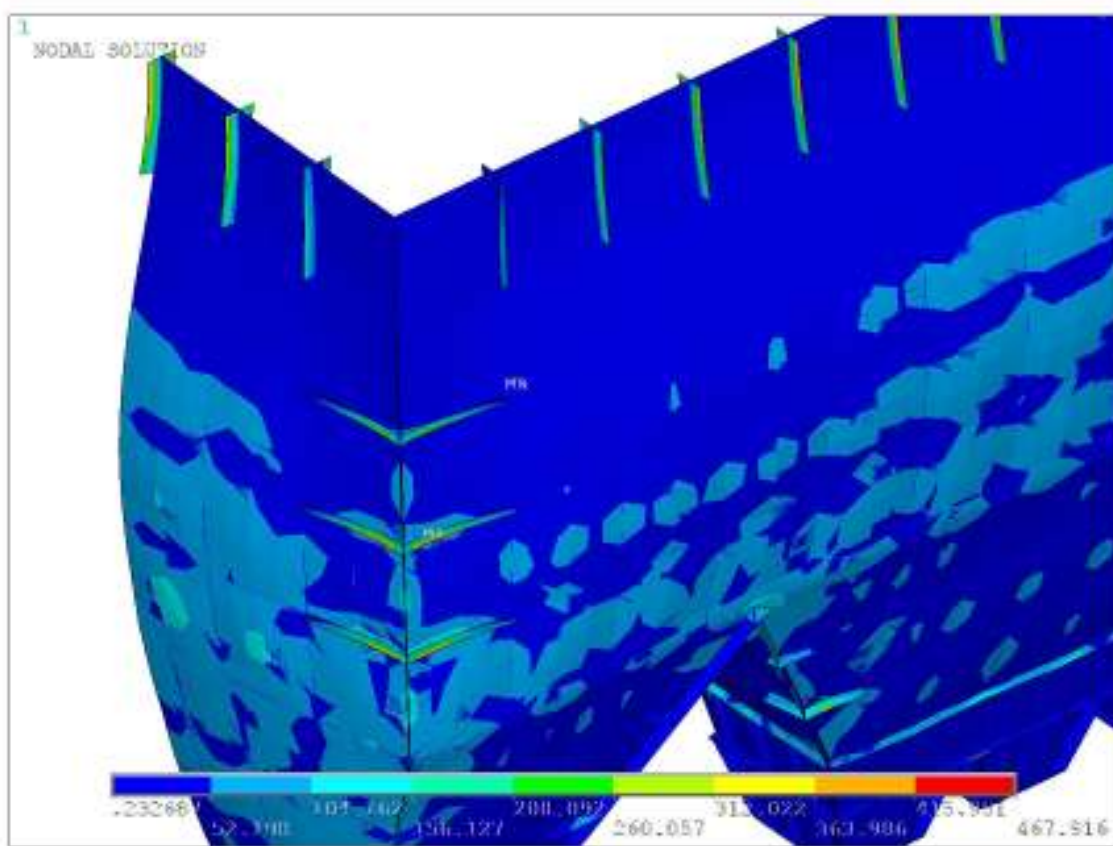
Počet stupňů volnosti .....28 485

## 2.4. Výsledky

Vlivem tlaku sypké hmoty dojde k vyboulení stěn komory zásobníku o maximální hodnotu přibližně 4cm. Největší vyboulení se nachází na boční straně zásobníku. K určení napětí v zásobníku jsem použil pevnostní hypotézu von Misses. Ta mi ukázala, že největší napětí je v plechových výztuhách na komoře zásobníku a to přibližně 470MPa. Maximální napětí v samotné stěně zásobníku se pohybovalo okolo 150MPa.



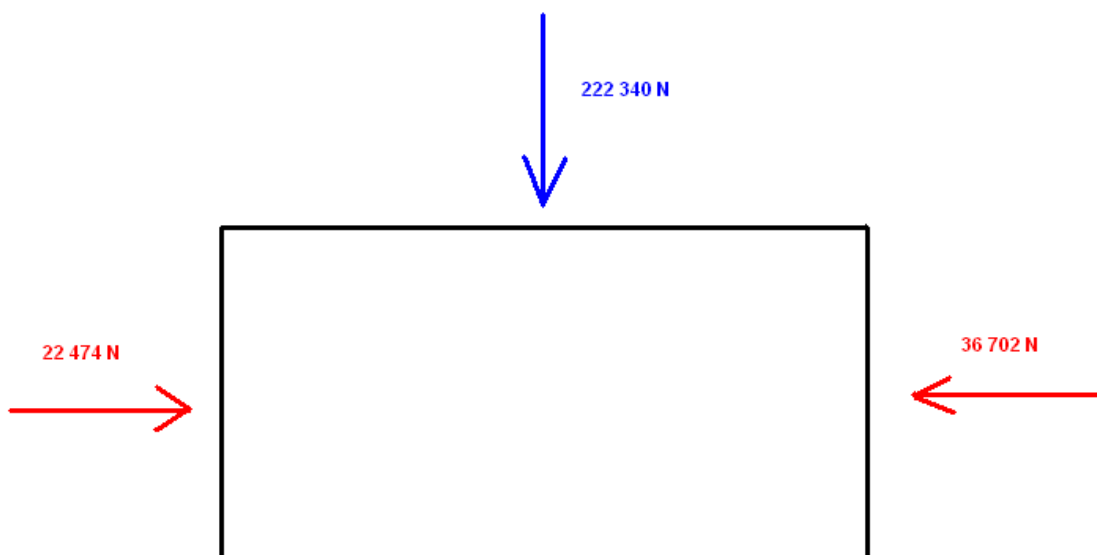
Obrázek 26 – Deformace zásobníku ( zvětšeno )



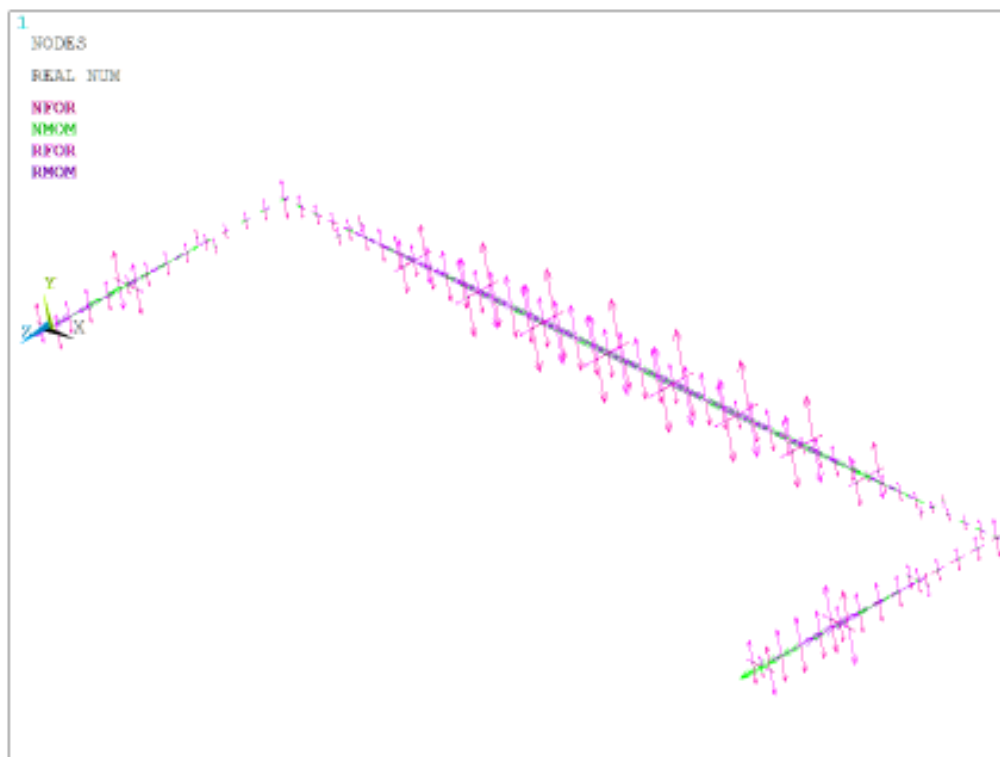
Obrázek 27 – Napětí na zásobníku

Reakce v místě uchycení:

Pro zjištění velikostí reakcí v místě uchycení jsem si vytvořil tři pojmenované soubory (komponenty) sestavené z uzlů, které mají souřadnici  $y = 0$ . Každá komponenta odpovídá jedné stěně svislého zásobníku. Do komponenty jsou zahrnuty jak uzly odpovídající samotné stěně, tak i uzly, které náležejí plechovým výztuhám.



Obrázek 28 – Hodnoty vodorovných reakcí na stěnách zásobníku



Obrázek 29 – Reakce v uzlech, grafická interpretace velikosti reakcí

### 3. Konstrukční úpravy

Abych dosáhl snížení vodorovných složek reakcí navrhnul jsem několik konstrukčních úprav. Konstrukční úpravy budou provedeny v místě maximálního zaplnění zásobníku. Během úprav jsem musel dbát na několik podmínek.

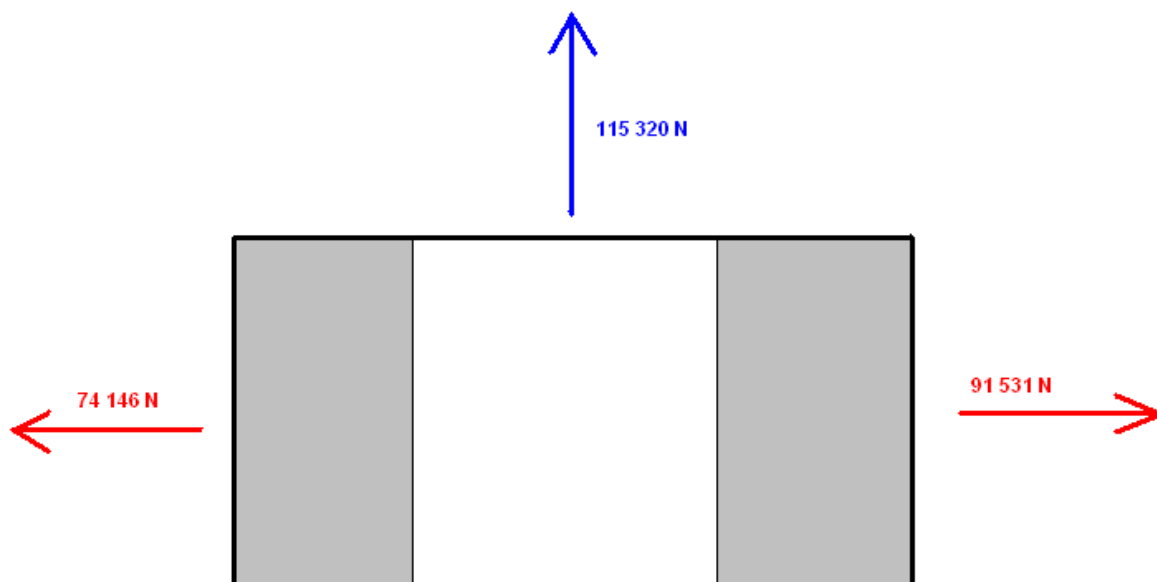
1. V zásobníku je třeba nechat minimálně tři metrový otvor určený pro plnění. Ten musí být umístěn přibližně uprostřed zásobníku.
2. Není možné příliš zvyšovat celkovou tíhu zásobníku.
3. Dbát na technologickou proveditelnost úprav.

Vyztužení jsem prováděl pouze plechy, nosníky nebo jejich kombinací. V následujících příkladech je pouze část ze všech vyzkoušených možností.

Vyztužení jsem prováděl v místě 1 viz. obr.7.

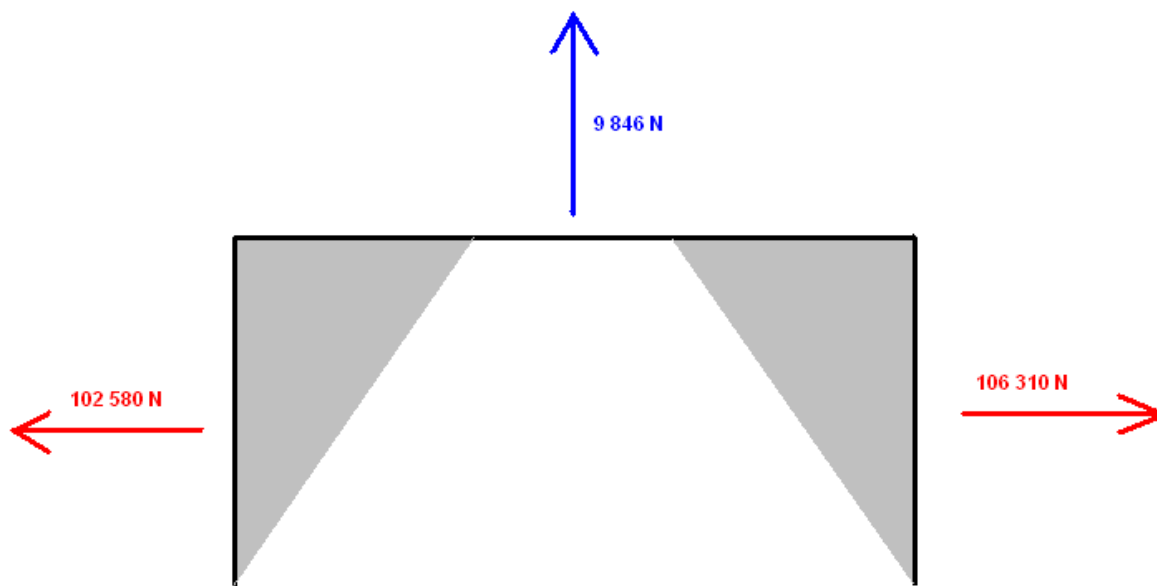
#### 3.1. Vyztužení pomocí plechů

Jako první možnost jsem vyzkoušel použití plechových výztuh přivařených k vnitřní části zásobníku.



Obrázek 30 – vyztužení dvěma obdélníkovými plechy

Z obrázku 30. je vidět, že došlo ke snížení velikosti reakcí na přední stěně zásobníku, ale také došlo k výraznému zvýšení hodnot na bočních stěnách.

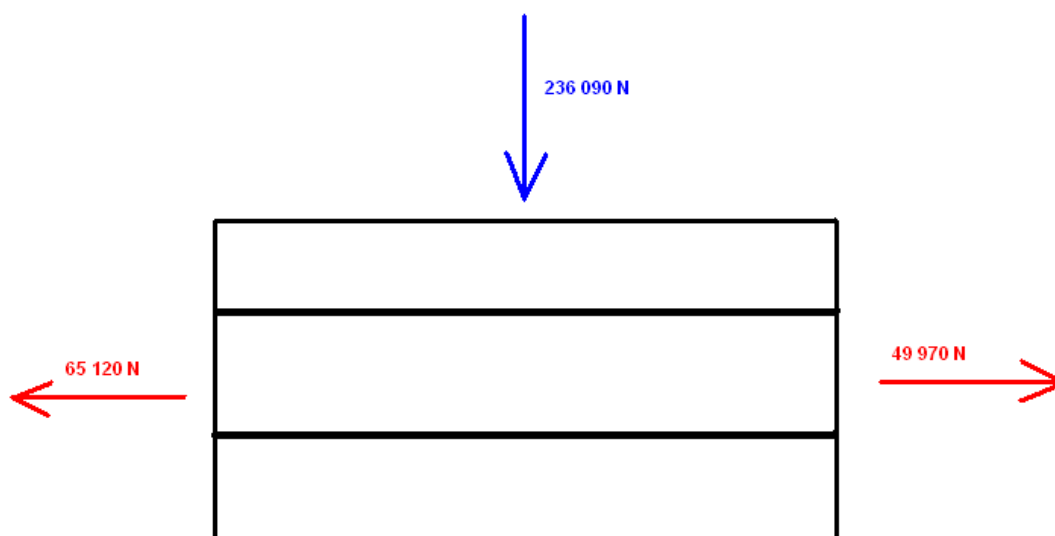


Obrázek 31 – vyztužení trojúhelníkovými plechy

Při tomto typu vyztužení došlo k výraznému snížení reakcí na přední stěně zásobníku, ale bohužel také k výraznému zvýšení na bočních stěnách.

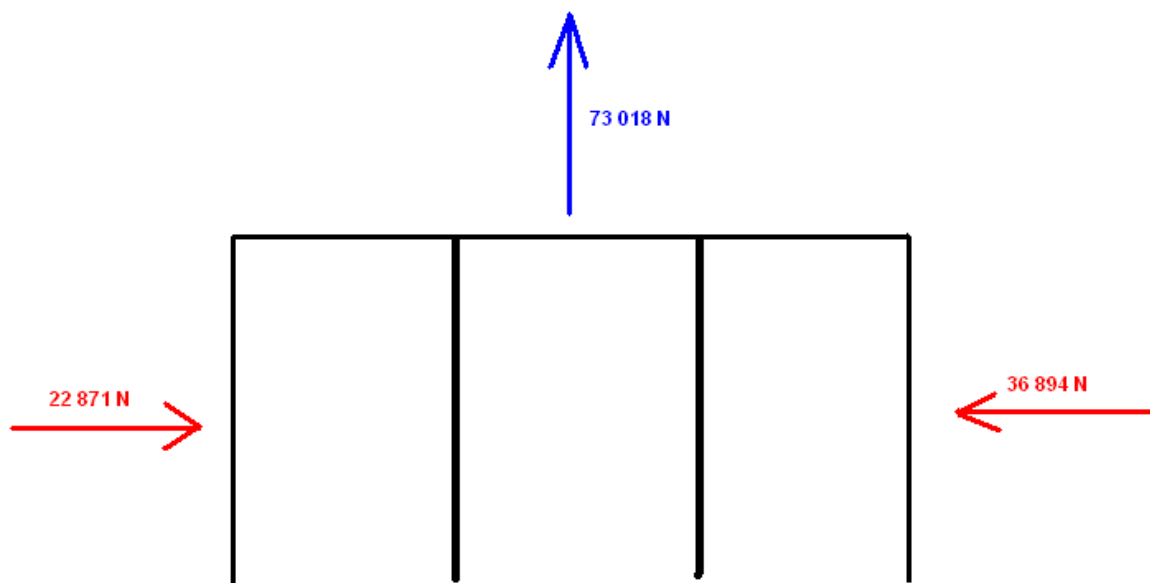
### 3.2. Vyztužení nosníky profilu I

Jelikož vyztužení pomocí plechů nesplnilo požadované podmínky, začal jsem vyztužovat zásobník nosníky s profilem I.



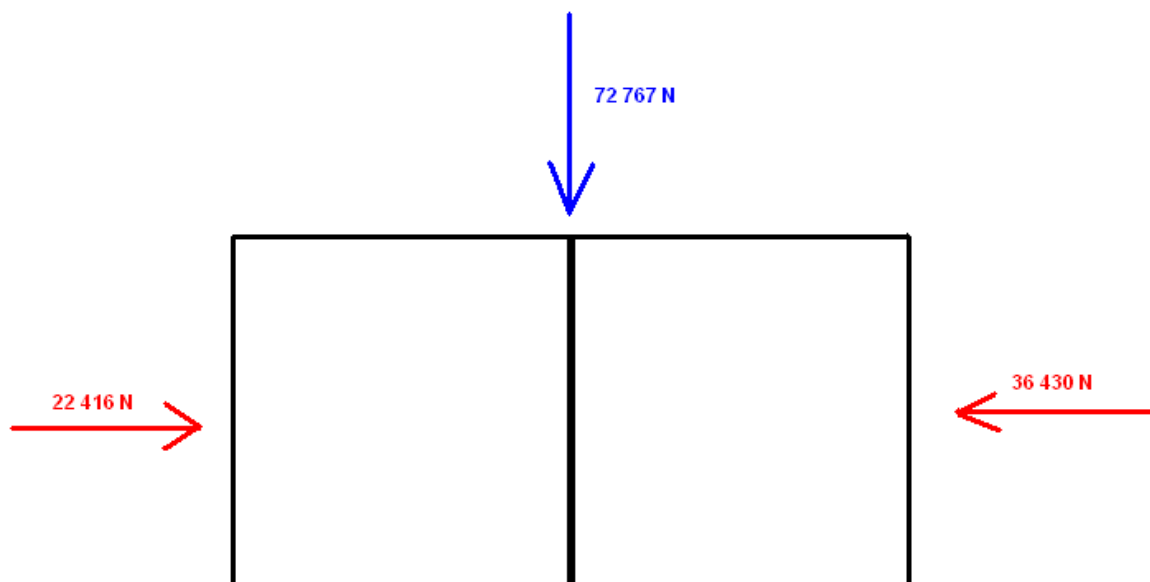
Obrázek 32 – vyztužení podélnými nosníky

Při použití podélných nosníku se velikosti reakcí zvýšily na všech stěnách zásobníku.



Obrázek 33 – vyztužení dvěma příčnými nosníky

Při použití tohoto tyto vyztužení došlo k výraznému snížení reakcí na přední stěně zásobníku, a pouze mírnému zvýšení hodnot reakcí na bočních stranách.

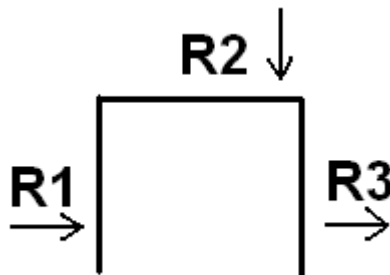


Obrázek 34 – vyztužení jedním příčným nosníky

Při použití jednoho příčného nosníku došlo opět k výraznému snížení reakcí na přední stěně a také došlo k mírnému snížení reakcí na bočních stěnách zásobníku.

### 3.3. Tabulky velikostí reakcí

Tabulka velikosti reakcí na jednotlivých stěnách pro různé úpravy:



stěna / typ výztuhy	R1 [ N ]	R2 [ N ]	R3 [ N ]
	22 474	222 340	- 36 702
	- 102 580	- 9 486	106 310
	- 74 146	- 115 320	91 531
	- 65 120	236 090	49 970
	29 181	- 73 994	- 41 183
	29 141	- 51 353	- 41 618
	22 871	- 73 018	- 36 844
	26 006	- 53 134	- 40 850
	- 61 327	84 095	46 880
	- 60 882	- 26 487	46 104
	22 416	72 767	- 36 430

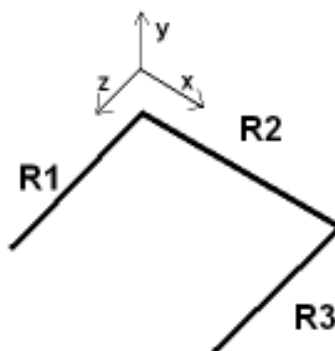
**zelená:** došlo ke snížení velikosti reakce

**červená:** došlo k zvýšení velikosti reakce

**černá:** hodnota zůstala přibližně stejně velká



Tabulky reakcí ve všech směrech před úpravou a po úpravě s jedním příčným nosníkem:



bez úprav	R1 [N]	R2 [N]	R3 [N]
$\Sigma F_x$	22 474	- 15 038	-36 702
$\Sigma F_y$	458 130	2 424 300	708 920
$\Sigma F_z$	- 112 760	222 340	-214 070

s úpravou	R1 [N]	R2 [N]	R3 [N]
$\Sigma F_x$	22 416	-15 251	-36 430
$\Sigma F_y$	463 150	2 419 200	709 530
$\Sigma F_z$	-112 760	72 767	-213 510

Z tabulek je zřejmé, že došlo k výraznému snížení velikostí reakcí R2 ve vodorovném směru z a ostatní výsledné hodnoty zůstaly téměř nezměněny.

Velikost zatížení na 1m délky svaru:

bez úprav	Z1 [kN/m]	Z2 [kN/m]	Z3 [kN/m]
x	7,49	1,4	12,2
y	153,7	220,4	236,5
z	37,6	20,2	71,3

s úpravou	Z1 [kN/m]	Z2 [kN/m]	Z3 [kN/m]
x	7,47	1,4	12,1
y	154,3	219,9	236,5
u	37,6	6,6	71,1

## 4. Závěr

Po provedení MKP analýzy zásobníku, jsem zjistil, že největší hodnota vodorovných reakcí kolmé na stěny se nachází na přední straně zásobníku. Na bočních stranách působí reakce značně menší, ale nesmíme zapomínat, že tyto hodnoty jsou pouze na polovině stěny a proto na celou boční stěnu budou ve skutečnosti působit síly 2x větší.

Jako nejvhodnější úpravu bych zvolil přivaření jednoho příčného nosníku přibližně uprostřed zásobníku. Díky tomu by bylo zapotřebí upravit systém plnění zásobníku, který by již nemohl být plněn jedním otvorem uprostřed, ale například dvěma otvory umístěných více na boční části zásobníku. Pokud by tato úprava plnění nebyla možná, doporučil bych úpravu zásobníku pomocí dvou příčných nosníků přivařených tak aby mezi nimi byla vzdálenost odpovídající potřebnému otvoru pro plnění.

Z hlediska maximálních deformací viz. Obr. 26 a maximálních napětí viz. obr. 27 bude nutné na konstrukci provést úpravy. Bakalářská práce se ale touto úpravou nezabývala.

## 5. použitá literatura

- [1] Dolák - Výkresová dokumentace ZÁSOBNÍK UHLÍ-1, Trinom, 2006
- [2] Medek, J. - *Mechanické pochody*, VUT v Brně, 1998. 217 s. ISBN 80-214-1264-X
- [3] Studnička, J., Holický, M., Marková, J. - *Ocelové konstrukce – Zatížení*, ČVUT v Praze. Fakulta stavební. 2009. 139 s. ISBN 978-80-01-03768-3
- [4] ANSYS® Academic Teaching Advanced, Release 11.0, Help System, Element library, ANSYS, Inc.
- [5] Horyl, P. - Makra v jazyce APDL

### Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Petru Horylovi, CSc. za cenné rady a připomínky v průběhu řešení této práce.